



ING. MECATRÓNICA

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: Ing. Christian David Vargas Sosa

TUTOR: Ing. Cristian Giselle Oscullo Naranjo, MSc.

Diseño y construcción de un sistema prototipo mecatrónico de examinación de productos en cultivos de ají de árbol (*Capsicum Annuum*) para la verificación de la calidad durante su crecimiento, florecimiento y cosecha.

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Christian David Vargas Sosa, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Christian David Vargas Sosa', written in a cursive style.

C.I.: 1720246170

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, Cristina Giselle Oscullo Naranjo, certifico que conozco al autor del presente trabajo de Investigación “Diseño y construcción de un sistema prototipo mecatrónico de examinación de productos en cultivos de ají de árbol (*Capsicum Annuum*) para la verificación de la calidad durante su crecimiento, florecimiento y cosecha”, Christian David Vargas Sosa, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



.....

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Agradecimientos

A la fecha del término de este escrito, han pasado 1,401 días desde que mi madre se volvió una con el universo y no sé cuantos días pasaron desde que desconocí la imagen de mi padre. Aún así, y desde un exiguo y sencillo espacio en la sala de mi departamento les dedico a ustedes, Ana y Walter, un sueño mutuo materializado.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | | |
|------|--|----|
| 1. | Tema | 1 |
| 2. | Objetivos | 1 |
| 2.1. | General | 1 |
| 2.2. | Específicos | 1 |
| 3. | Problema | 2 |
| 4. | Hipótesis | 3 |
| 5. | Estudio Teórico del Proceso de Cosecha Agrícola del Ají de Árbol (Capsicum Annuum) | 4 |
| 5.1. | Preparación del Suelo | 4 |
| 5.2. | Siembra | 5 |
| 5.3. | Crecimiento | 6 |
| 5.4. | Floración | 7 |
| 5.5. | Fructificación | 7 |
| 5.6. | Cosecha | 8 |
| 6. | Tendencias Globales en la Implementación Tecnológica Agrícola | 8 |
| 6.1. | Sistemas de Monitoreo y Sensores | 9 |
| 6.2. | Agricultura de Precisión | 9 |
| 6.3. | Drones y Vehículos Autónomos | 10 |
| 6.4. | Gestión de Datos y Plataformas Tecnológicas | 10 |
| 6.5. | Hidroponía y Agricultura Vertical | 10 |
| 6.6. | Tecnologías de Postcosecha | 10 |
| 6.7. | Sistemas de Riego Inteligente | 11 |
| 6.8. | Biotecnología y Control Biológico | 11 |
| 7. | Análisis y Selección de Alternativas | 11 |
| 7.1. | Especificaciones Técnicas | 11 |
| 7.2. | Análisis Funcional | 12 |
| 7.3. | Matriz Morfológica | 14 |
| 7.4. | Matriz de Residuos Ponderados | 15 |

| | | |
|-------|--|----|
| 8. | Diseño Mecánico..... | 16 |
| 8.1. | Análisis y Dimensionamiento Geométrico..... | 19 |
| 8.2. | Análisis y Dimensionamiento del Sistema de Encapsulamiento de Plan- tas..... | 21 |
| 8.3. | Cálculo Estructural del Sistema Prototipo | 23 |
| 8.4. | Cálculo de Motores | 34 |
| 9. | Dimensionamiento Electrónico..... | 36 |
| 9.1. | Módulo Procesador IoT ESP232 | 37 |
| 9.2. | Motores a Paso NEMA 23..... | 38 |
| 9.3. | Motores DC de 12 Voltios..... | 39 |
| 9.4. | Driver Controlador DM860..... | 40 |
| 9.5. | Sensor ultrasónico HC-SR04..... | 41 |
| 9.6. | Cámara web Genius 1000X | 42 |
| 9.7. | Driver de motor DC BTS7960 (HW-039)..... | 43 |
| 9.8. | Consumo eléctrico de componentes activos y pasivos..... | 44 |
| 10. | Diseño Informático: Redes Neuronales y Machine Learning..... | 45 |
| 10.1. | Redes Neuronales Artificiales | 47 |
| 10.2. | Entrenamiento de una Red Neuronal Artificial | 48 |
| 10.3. | Generación de Bases de Datos..... | 49 |
| 10.4. | Procesamiento virtual de imágenes en Roboflow | 50 |
| 10.5. | Entrenamiento de la red neuronal: YoloV5 (You Only Look Once ver- sion 5) | 53 |
| 10.6. | YoloV5s ((You Only Look Once version 5 Small) | 54 |
| 10.7. | Configuración y Preparación de la Red Neuronal | 54 |
| 11. | Conclusiones..... | 67 |
| 12. | Recomendaciones | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 1. Preparación de suelo para plantación de semillas y germen de Capsicum Annuum | 4 |
| 2. Proceso de siembra tradicional del ají ecuatoriano. | 6 |
| 3. Etapas de crecimiento de una planta de Capsicum Annuum. | 6 |
| 4. Etapa de florecimiento de una planta de Capsicum Annuum. | 7 |
| 5. Proceso de maduración natural del Capsicum Annuum. Nótese el cambio de tonalidades del fruto. | 7 |
| 6. Metodología convencional de cosecha del Capsicum Annuum. | 8 |
| 7. Diagramación de los módulos del Nivel 0 del análisis funcional del sistema prototipo | 12 |
| 8. Diagramación de los módulos del Nivel 1 del análisis funcional del sistema prototipo | 13 |
| 9. Diagramación de los módulos del Nivel 2 del análisis funcional del sistema prototipo | 14 |
| 10. Alternativas matriz de residuos ponderados. | 16 |
| 11. Alternativa seleccionada de la matriz de residuos ponderados. | 16 |
| 12. Bosquejo del sistema prototipo mecatrónico de examinación propuesto bajo la alternativa seleccionada. | 17 |
| 13. Vista superior del modelo CAD del sistema prototipo. | 18 |
| 14. Sistema de encapsulamiento visual de las plantas de ají (Vista Superior) | 18 |
| 15. Sistema de encapsulamiento visual de las plantas de ají (Vista Frontal). | 19 |
| 16. Área total Ideal para la examinación de la planta. | 20 |
| 17. Geometría final del sistema prototipo (Vista Superior) | 22 |
| 18. Geometría final del sistema prototipo (Vista Frontal) | 22 |
| 19. Geometría final global del sistema prototipo | 23 |
| 20. Restricciones y aplicación de carga para el efector | 24 |
| 21. Esfuerzo máximo de Von Mises en el efector móvil. | 25 |
| 22. Deflexión máxima en el efector móvil | 26 |

| | |
|---|----|
| 23. Aplicación de fuerzas y cargas para el Carro X e Y | 27 |
| 24. Esfuerzo máximo de Von Mises para el Carro X e Y | 27 |
| 25. Deflexión máxima para el Carro X e Y..... | 28 |
| 26. Restricciones y cargas de la bancada de soporte..... | 29 |
| 27. Esfuerzo máximo de Von Mises para la bancada | 29 |
| 28. Deformación máxima de la bancada | 30 |
| 29. Restricciones y carga accidental sobre estructura del prototipo | 31 |
| 30. Esfuerzo máximo de Von mises máxima de carga accidental del prototipo | 31 |
| 31. Deflexión máxima de carga accidental del prototipo | 32 |
| 32. Puntos débiles de la estructura a ser considerados..... | 32 |
| 33. Momento máximo en los rodamientos lineales | 33 |
| 34. Localización de los motores para el movimiento en los ejes X e Y..... | 35 |
| 35. Diagrama de bloques para dimensionamiento electrónico..... | 37 |
| 36. Módulo Procesador IoT ESP232 | 38 |
| 37. Configuración física electrónica del Modulo Procesador lot ESP32..... | 38 |
| 38. Motor a pasos NEMA 23 | 39 |
| 39. Motor DC de plumas de autos..... | 40 |
| 40. Driver DM860 para control de motores de precisión a pasos | 41 |
| 41. Sensor ultrasónico HC-SR04 | 42 |
| 42. Cámara web Genius 1000X..... | 43 |
| 43. Driver de motor DC BTS7960 (HW-039)..... | 43 |
| 44. Fuente de Alimentación de 24V a 20 Amp..... | 45 |
| 45. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema prototipo de examinación de plantas de ají Capsicum Annuum..... | 46 |
| 46. Estructura de una Red Neuronal Artificial dentro del entorno de Machine Learning..... | 47 |
| 47. Etapas del entrenamiento de una Red Neuronal Artificial..... | 48 |
| 48. Fotografía de la plana modelo utilizada para la toma de imágenes experimen- tales para la construcción de la base de datos del modelo a entrenar | 50 |

| | |
|--|----|
| 49. Captura de pantalla del etiquetado de ajíes de una fotografía de la planta modelo dentro de un sketch de la plataforma de Roboflow. Obsérvese los <i>bounding boxes</i> de los ajíes con colores verdes y turquesas..... | 51 |
| 50. Captura de pantalla del etiquetado de ajíes de una fotografía de la planta modelo dentro de un sketch de la plataforma Roboflow. Obsérvese los <i>bounding boxes</i> de los ajíes con colores verdes y turquesas..... | 51 |
| 51. Imagen perteneciente a la base de datos pre-existente en la plataforma <i>Roboflow</i> , en la cual se puede distinguir el correcto etiquetado en <i>bounding boxes</i> del producto en cuerpo completo sin la exclusión de ninguno de ellos | 52 |
| 52. Imagen perteneciente a la base de datos pre-existente en la plataforma <i>Roboflow</i> , en la cual se puede distinguir el correcto etiquetado en <i>bounding boxes</i> del producto en cuerpo completo sin la exclusión de ninguno de ellos | 52 |
| 53. Diagrama de bloques explicativo para la conformación y configuración del entrenamiento de una red neuronal con la arquitectura de YoloV5s..... | 55 |
| 55. Expresiones matemáticas para el cálculo de las magnitudes de entrenamiento del modelo de predicción de ajíes generado en función de los verdaderos positivos, verdaderos negativos, falsos positivos y falsos negativos, de todas las clases | 59 |
| 54. Matriz de confusión generada del modelo entrenado en YoloV5 con los errores cometidos por el modelo de detección de ajíes al realizar predicciones sobre los datos de prueba..... | 60 |
| 56. Captura de pantalla de la matriz de confusión resultado generada en el cuadernillo de Jupyter Notebook tras entrenar y validar, durante 200 iteraciones programadas, el modelo de YoloV5..... | 62 |
| 57. Precisión de la predicción obtenida de los ajíes en la planta sujeto de prueba (que se muestran como <i>aji_verde</i> o <i>aji_rojo</i>)..... | 62 |
| 58. Precisión de la predicción obtenida de los ajíes rojos (que se muestran como <i>aji_rojo</i>). | 63 |
| 59. Precisión de la predicción obtenida de los ajíes verdes (que se muestran como <i>aji_verde</i>). | 63 |

60. Gráfica de optimización de los valores de los *boundingboxes*. Esta gráfica muestra la reducción del error de la predicción de *boundingboxes* durante el entrenamiento..... 64
61. La gráfica de optimización de la predicción de las clases. Esta gráfica muestra la reducción del error de la predicción de las clases durante el entrenamiento..... 64
62. La gráfica de optimización de los valores de "objectness", la cual refleja la probabilidad de que una caja(box) contenga un objeto. Esta gráfica muestra la reducción del error en la medida..... 65
63. Gráfica de pérdida de clasificación en validación. Esta gráfica muestra la pérdida relacionada con la clasificación de ajíes en las clases durante la fase de validación. La pérdida de clasificación en validación se utiliza para evaluar la capacidad del modelo de asignar la clase correcta a cada ají detectado en los datos de validación. Una disminución en la pérdida de clasificación indica que el modelo está mejorando su capacidad para reconocer y clasificar los ajíes en las categorías correctas en los datos de validación..... 65
64. Gráfica de pérdida de objetos en validación. Esta gráfica representa la pérdida asociada a la detección y clasificación de objetos durante la fase de validación. Mide la discrepancia entre las detecciones realizadas por el modelo y las anotaciones de objetos reales en los datos de validación. Una disminución en la pérdida de objetos indica una mejora en la capacidad del modelo para detectar y clasificar los ajíes correctamente en los datos de validación . 66
65. Gráfica de pérdida de *boundingboxes* en validación. Esta gráfica muestra la evolución de la pérdida asociada a la precisión de la localización de *boundingboxes* alrededor de los ajíes durante la fase de validación. Cuanto menor sea la pérdida de cajas, mejor será la capacidad del modelo para ajustarlas y ubicarlas alrededor de los ajíes con precisión en los datos de validación 66

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| 1. Variantes más comunes de Capsicum Annuum, también conocido como ají de árbol, del mercado Ecuatoriano. | 5 |
| 2. Análisis de Alternativas del Sistema Prototipo..... | 15 |
| 3. Criterios de Ponderación y sus respectivas asignaciones de variables..... | 15 |
| 4. Características mecánicas del acero..... | 24 |
| 5. Características de los elementos finitos..... | 24 |
| 6. Valores de componentes anclados al efector final..... | 25 |
| 7. Valores de masa para el Carro Y..... | 26 |
| 8. Valores de masa totales para la bancada..... | 28 |
| 9. Resumen del comportamiento mecánico de la estructura tras la simulación por el método de elementos finitos..... | 34 |
| 10. Valores de masa para los ejes X e Y..... | 34 |
| 11. Características técnicas del sensor ultrasonico HC-SR04..... | 42 |
| 12. Consumo Eléctrico de Elementos Activos..... | 44 |
| 13. Consumo Eléctrico de Elementos Pasivos..... | 44 |
| 14. Hiperparámetros típicos utilizados para poder generar los entrenamientos de predicción del modelo generado en YoloV5s..... | 57 |
| 15. Tabla matriz de datos correspondiente a la época 0/199 del entrenamiento de la red neuronal. Obsérvese los valores de los parámetros de regresión de cada iteración. | 58 |
| 16. Tabla matriz de datos correspondiente a la época 196/199 del entrenamiento de la red neuronal. Obsérvese los valores de los parámetros de regresión de cada iteración. | 58 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo A: Desarrollo de la QFD..... | 70 |
| Anexo B: Matriz morfológica..... | 76 |
| Anexo C: Análisis de alternativas..... | 78 |

Anexo E: Catálogo Dipac para tubo estructural rectangular 80

Anexo E: Catálogo Dipac para tubo estructural rectangular 82

Anexo E: Catálogo Dipac para tubo estructural rectangular 84

Anexo I: Planos de construcción 85

SISTEMA PROTOTIPO MECATRÓNICO PARA LA EXAMINACIÓN DE PLANTAS DE AJÍ DE ÁRBOL (CAPSICUM ANNUUM) PARA LA VERIFICACIÓN DE ACUERDO A SU COLOR.

1. Tema

Diseño y construcción de un sistema prototipo mecatrónico de examinación de productos en cultivos de ají de árbol (capsicum annuum) para la verificación de acuerdo a su color.

2. Objetivos

2.1. General

Diseñar y construir un sistema prototipo mecatrónico de examinación de productos en cultivos de ají de árbol (Capsicum Annuum) para la verificación de acuerdo a su color.

2.2. Específicos

- Investigar y documentar las etapas de crecimiento y maduración del producto agrícola Capsicum Annuum.
- Diseñar e implementar un sistema mecánico cartesiano que se desplace linealmente a través de los ejes X e Y sobre una planta de ají Capsicum.
- Dimensionar, seleccionar e implementar los elementos electrónicos necesarios que posibiliten el la operatividad del sistema prototipo.
- Dimensionar, seleccionar e implementar los elementos mecánicos necesarios que posibiliten el la operatividad del sistema prototipo.
- Implementar los algoritmos de control necesarios para garantizar el funcionamiento conjunto de la partes mecánicas y electrónicas del sistema prototipo.
- Implementar un modelo de red neuronal artificial para el reconocimiento de los colores de los frutos de una planta de ají de árbol (Capsicum Annuum).

- Seleccionar un medio de reconocimiento digital para el análisis de una planta de ají de árbol (*Capsicum Annuum*).
- Diseñar una interfaz informativa amigable con el usuario para el despliegue de la información obtenida.
- Evaluar cómo el desarrollo del sistema prototipo examinador de plantas de ají *Capsicum* afecta el proceso de aprendizaje del estudiante.

3. Problema

Para las empresas agrícolas productoras, maximizar sus ganancias se traduce en superar determinados obstáculos (de origen natural y humano) que permiten garantizar una mayor y mejor productividad dentro de sus campos; algunos de ellos, el uso de semillas de mala calidad, el manejo inadecuado de prácticas agrícolas y la falta de tecnologías agrícolas inteligentes. Estas son algunas y, quizá, de las problemáticas de mas alta ocurrencia a las que se que enfrentan en el diario vivir, pues como resultado de esto, cierta materia prima es inservible y resulta difícil cumplir con los volúmenes requeridos por los clientes, y por sobre todo, pérdidas monetarias para los inversionistas de la agroindustria.

Toda la producción de ají generada, durante su cosecha, es evaluada bajo ciertos atributos que imperan durante su etapa de control de calidad, factores como el color del producto y las cantidades de ajíes producidos por cada hilera de planta, son aspectos que ayudan a conocer a los agricultores si la metodología de cultivo que están aplicando a las matas de *Capsicum Annuum* es la adecuada (refiriéndonos explícitamente a la sedimentación del suelo, la luz y la temperatura de exposición de las matas, las necesidades de riego y tiempos de cuidado) y por, sobre todo, si el sistema es económicamente prometedor y escalable a largo plazo. Pero, cuando estos factores no muestran buena fortuna, desembocan en la absoluta imposibilidad de comercializar dichos productos internacionalmente y, más aún, ser cohibidos de obtener un renombre en los territorios vecinos, encajando así dentro del 10% de la mercancía que se queda en el mercado local ecuatoriano.

Dentro de las factorías agrícolas de producción de ají ecuatoriano, en su gran mayoría, son operadas a mano bajo simple inspección visual, y son empacados asumiéndose que

todos los ajíes de cosecha cumplen con las condiciones requeridas de color, cantidad, fisiología, varianza entre especies, entre otros. Es aquí, precisamente, donde las tecnologías agropecuarias y sistemas inteligentes de cultivo que le permiten a los agricultores obtener una data precisa y real de sus campos brillan por su ausencia, ya sea por falta de políticas públicas que impulsen al sector agropecuario estimar estas posibilidades o, simple y llanamente, por la negativa de los agricultores a dar un paso hacia la digitalización.

4. Hipótesis

La presente investigación se enfoca en el diseño y construcción de un sistema prototipo mecatrónico que revoluciona la inspección de plantas de ajíes mediante la incorporación de tecnologías avanzadas en el ámbito agrícola. Al implementar un modelo tecnológico de detección de ajíes basado en una red neuronal artificial, se busca abordar los desafíos tradicionales asociados con el control de calidad en la etapa de cosecha de los cultivos.

La hipótesis planteada sugiere que al aplicar este sistema prototipo, se logrará una transformación significativa en la manera en que se examinan y seleccionan los frutos de una planta *Capsicum*. Se espera que la integración de una red neuronal artificial permita una lectura identificativa más precisa y rápida de los colores de este producto, lo que, a su vez, resultaría en una mejora en la calidad de la clasificación de los ajíes y una optimización del proceso de selección.

Además, se supone que este enfoque innovador generará beneficios económicos tangibles para la industria agrícola. Al aumentar la eficiencia y la precisión en la detección de ajíes, se espera una mayor productividad en la producción de cultivos del sector donde se decida implementarlo. La implementación de tecnologías en la agroindustria podría tener un impacto positivo en la optimización de recursos y en la reducción de costos asociados con la inspección y selección manual.

En última instancia, si los resultados de esta investigación confirman esta hipótesis, se abriría la puerta a nuevas formas de aplicar tecnologías en la agroindustria, no solo en la producción de ajíes, sino también en cultivos de verduras, hortalizas, vegetales y legumbres. La combinación de la ingeniería mecatrónica y la potencia de la inteligencia artificial podría marcar un hito en la modernización de las prácticas rudimentarias de los

agricultores, impulsando una mayor eficiencia, sostenibilidad y calidad en la economía del sector ecuatoriano y del mundo entero.

5. Estudio Teórico del Proceso de Cosecha Agrícola del Ají de Árbol (*Capsicum Annuum*)

El ají de árbol, chile de árbol o ají criollo (conocido popularmente dentro de la jerga gastronómica ecuatoriana) es una planta que se cultiva principalmente en las regiones de clima cálido y seco del país. El proceso de cosecha del ají de árbol se describe en las líneas siguientes.

5.1. Preparación del Suelo

Antes de plantar las semillas de *Capsicum Annuum*, es necesario preparar el suelo. Esto implica la eliminación de maleza, la aireación del suelo y la adición de nutrientes para asegurar que las plantas crezcan sanas y fuertes, véase la Figura 1. Vale la pena hacer mención de que el proceso de cosecha del ají de árbol puede variar dependiendo de la región y las prácticas culturales de cada agricultor, y también de que existen muchos tipos de *Capsicum Annuum* que circulan por el mercado gastronómico del Ecuador [1]. Las variantes de este producto se presentan en la Tabla 1.



Figura 1. Preparación de suelo para plantación de semillas y germen de *Capsicum Annuum*

Tabla 1. Variantes más comunes de *Capsicum Annuum*, también conocido como ají de árbol, del mercado Ecuatoriano.

| Tipos | Imagen |
|---|---|
| <p>Ají Morrón: Es un tipo de pimiento grande, carnoso y dulce. Es muy utilizado en la gastronomía mediterránea y se utiliza en la preparación de guisos, asados, ensaladas y otros platos. [1].</p> |  |
| <p>Ají Picante: Existen muchas variedades de pimientos picantes, como el jalapeño, el serrano, el habanero, el cayena, entre otros. Estos pimientos se utilizan para agregar un sabor picante y un toque de calor a los platos. [1].</p> |  |
| <p>Ají Ancho: También conocido como chile poblano, es un tipo de pimiento grande y carnoso con un sabor ligeramente picante y dulce. Se utiliza en la preparación de platos típicos de la gastronomía mexicana, como los chiles rellenos. [1].</p> |  |
| <p>Ají de Árbol: Es un tipo de pimiento delgado y alargado, con un sabor muy picante y un intenso aroma. Es muy utilizado en la preparación de salsas y adobos.</p> |  |

5.2. Siembra

Las semillas de ají de árbol se siembran en filas separadas por al menos una distancia de 50 cm como promedio. Una vez sembradas, se cubren con una capa delgada de tierra y se riegan ligeramente a lo largo de canales de tierra [2]. Véase su representación en la Figura 2.



Figura 2. Proceso de siembra tradicional del ají ecuatoriano.

5.3. Crecimiento

La planta de ají de árbol comienza a crecer en aproximadamente 2-3 semanas después de la siembra. Es importante asegurarse de que las plantas reciban agua regularmente y suficiente luz solar para crecer correctamente [3]. La ilustración de este proceso se muestra en la Figura 3

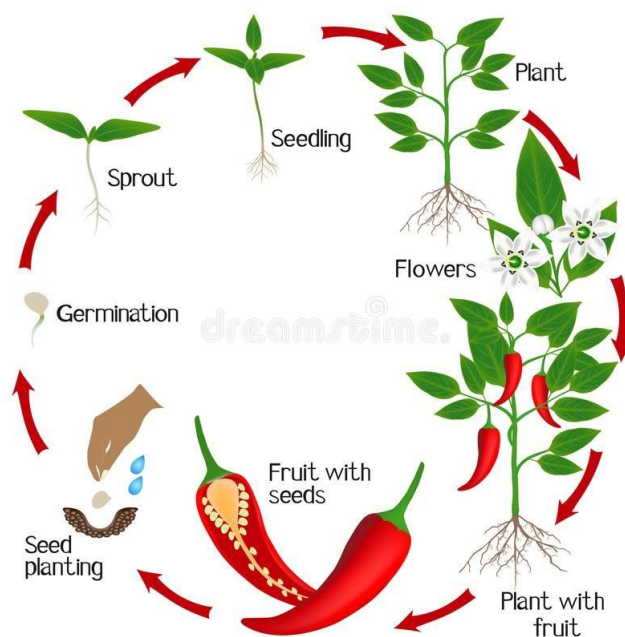


Figura 3. Etapas de crecimiento de una planta de *Capsicum Annuum*.

5.4. Floración

La planta de ají de árbol comienza a florecer después de aproximadamente 2-3 meses después de la siembra. Las flores son pequeñas y blancas, y suelen aparecer en racimos. Es crucial mantener buenos cuidados durante esta etapa de crecimiento. [3]. La ilustración de este proceso se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Etapa de florecimiento de una planta de Capsicum Annuum.

5.5. Fructificación

Después de la etapa de floración, la planta de ají de árbol comienza a producir los primeros frutos. Los frutos de ají de árbol son pequeños y verdes al principio, y luego cambian a un color rojo intenso a medida que maduran, pasando por un tono amarillizo y naranja. [3]. Este proceso puede observarse en la Figura 5.



Figura 5. Proceso de maduración natural del Capsicum Annuum. Nótese el cambio de tonalidades del fruto.

5.6. Cosecha

Los frutos de ají de árbol se pueden cosechar cuando han alcanzado su madurez y han cambiado de color a rojo. La mejor forma de cosechar los frutos es utilizando tijeras de podar para cortar los frutos directamente del tallo de la planta. [3]. La representación de esta etapa se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Metodología convencional de cosecha del *Capsicum Annum*.

6. Tendencias Globales en la Implementación Tecnológica Agrícola

En las últimas décadas, el sector agrícola ha experimentado una profunda transformación impulsada por los avances tecnológicos. La creciente demanda de alimentos, los desafíos medioambientales y la necesidad de mejorar la eficiencia en la producción han generado un escenario propicio para la implementación de soluciones tecnológicas innovadoras en la agricultura. Este fenómeno no solo ha tenido lugar a nivel global, sino que también ha dejado su huella en América Latina, una región con una rica tradición agrícola y un potencial significativo para aprovechar las tecnologías emergentes. En todo el mundo, la adopción de soluciones tecnológicas en la agricultura ha sido un catalizador clave para abordar desafíos cruciales. La automatización y robótica agrícola, por ejemplo, han permitido realizar tareas de siembra, cosecha y mantenimiento con mayor precisión y eficiencia. Ejemplos notables incluyen los drones y vehículos autónomos que monitorean cultivos y aplican tratamientos específicos, reduciendo el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes.

La Internet de las Cosas (IoT) también ha encontrado su camino en la agricultura a

través de sensores y dispositivos conectados. Esto permite la monitorización en tiempo real de condiciones ambientales, humedad del suelo y estado de los cultivos, lo que brinda a los agricultores información valiosa para la toma de decisiones. Asimismo, la analítica de datos y la inteligencia artificial han revolucionado la gestión agrícola al procesar grandes volúmenes de información para predecir rendimientos, optimizar la planificación y mitigar riesgos.

En América Latina, una región con una diversidad de climas y sistemas agrícolas, la implementación de soluciones tecnológicas ha demostrado ser un recurso vital para impulsar la productividad y la sostenibilidad. Por ejemplo, en Brasil, se han adoptado sistemas de riego inteligente que ajustan la cantidad de agua según las necesidades de los cultivos, reduciendo el desperdicio y aumentando la eficiencia. En Chile, se han empleado sensores y plataformas de análisis para controlar el crecimiento de la vid en la producción de vino, optimizando la calidad y la cantidad de la cosecha. En México, se ha avanzado en la monitorización de ganado mediante collares inteligentes que rastrean la salud y el comportamiento de los animales, permitiendo una gestión más eficaz de la ganadería.

A continuación, léanse algunas tecnologías del sector de la AgroTech.

6.1. Sistemas de Monitoreo y Sensores

- **Sensores de Humedad y Temperatura del Suelo:** Ayudan a optimizar el riego y el uso eficiente del agua
- **Estaciones Meteorológicas Automatizadas:** Proporcionan datos en tiempo real sobre condiciones climáticas para ajustar prácticas agrícolas.
- **Sistemas de Monitoreo Remoto:** Permite a los agricultores vigilar sus cultivos a través de dispositivos móviles o computadoras, recibiendo alertas y datos relevantes.

6.2. Agricultura de Precisión

- **Sistemas de Posicionamiento Global (GPS):** Utilizados en maquinaria agrícola para lograr una siembra y cosecha más precisas.

- Aplicación Variable de Insumos: Sistemas que ajustan la cantidad de agua, fertilizantes y pesticidas en función de las necesidades específicas de cada área del cultivo.

6.3. Drones y Vehículos Autónomos

- Drones Agrícolas: Utilizados para inspecciones aéreas, mapeo de cultivos y detección temprana de enfermedades.
- Tractores y Equipos Autónomos: Pueden ser programados para realizar tareas específicas de forma autónoma, mejorando la eficiencia.

6.4. Gestión de Datos y Plataformas Tecnológicas

- Software de Gestión Agrícola: Herramientas que ayudan a planificar, monitorear y administrar actividades agrícolas.
- Plataformas de Comercialización en Línea: Facilitan la venta directa de productos agrícolas a consumidores o compradores.

6.5. Hidroponía y Agricultura Vertical

- Sistemas de Cultivo Hidropónico: Permiten el cultivo en agua sin suelo, optimizando el uso de recursos y el espacio.
- Agricultura Vertical: Cultivo en capas superpuestas, ideal para zonas urbanas con espacio limitado.

6.6. Tecnologías de Postcosecha

- Cámaras de Almacenamiento Controlado: Mantienen la calidad de los productos almacenados al controlar la temperatura y la humedad.
- Tecnologías de Conservación: Como el uso de atmósferas modificadas o controladas para prolongar la vida útil de los productos.

6.7. Sistemas de Riego Inteligente

- Riego por Goteo y Microaspersión: Reducen el consumo de agua y garantizan una distribución uniforme.
- Sistemas de Riego Automatizado: Basados en datos climáticos y necesidades de los cultivos.

6.8. Biotecnología y Control Biológico

- Control Biológico de Plagas: Introducción de organismos beneficiosos para combatir plagas de forma natural.
- Biopesticidas y Biofertilizantes: Alternativas ecológicas a los pesticidas y fertilizantes químicos.

7. Análisis y Selección de Alternativas

7.1. Especificaciones Técnicas

El análisis de especificaciones técnicas se desarrolla a partir de satisfacer la necesidad de solucionar un problema. Estas especificaciones técnicas, en su conjunto, deben dar lugar a producto de calidad totalmente nuevo. Recuérdese que la definición del término calidad es definida como "Características y atributos que hacen que dicho producto cumpla o supere las expectativas y requisitos del consumidor. La calidad se relaciona con la capacidad del producto para cumplir su función de manera satisfactoria y ofrecer valor al cliente." [4]. Mediante la generación de las especificaciones técnicas se define el diseño del sistema prototipo atendiendo así a la necesidad del problema, generando así un diseño de calidad exitoso que satisface una necesidad. La elaboración del despliegue de la función de calidad, o también conocido como Casa de la calidad (QFD) se lo puede observar detallado en el Anexo A. Una QFD es una metodología utilizada en la gestión de la calidad para asegurar que los productos o servicios cumplan con las expectativas y necesidades de los clientes. A partir de la evaluación realizada, se determinó que, con el fin de lograr un diseño óptimo del sistema prototipo, es crucial enfocarse y dedicar más atención a los siguientes

aspectos: la selección y utilización de una cámara web adecuada, la modularidad mecánica de la máquina, la implementación de una interfaz bien estructurada que informe al usuario sobre el valor y estado de todas las variables del sistema, y la disponibilidad de un área de examinación adecuada para las plantas de ají Capsicum.

7.2. Análisis Funcional

Este análisis implica seccionar el sistema que se va a diseñar en diferentes módulos funcionales, los cuales se interrelacionan para lograr el objetivo para el cual se ha diseñado el sistema prototipo examinador de plantas Capsicum.

Nivel 0

Se representa el proceso de manera general en el cual se tiene en el ingreso una planta de ají Capsicum, energía de alimentación y una señal, con lo que se busca originar un sistema prototipo mecatrónico de examinación de productos en cultivos de ají de árbol (capsicum annuum) para la verificación de la calidad durante su crecimiento, florecimiento y cosecha, que tenga como salida documental un documento técnico, un paper técnico y los planos mecánicos del sistema. En la Figura 7 se presenta el nivel 0.

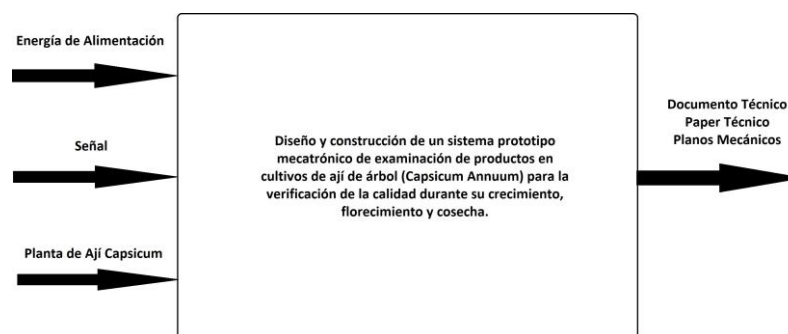


Figura 7. Diagramación de los módulos del Nivel 0 del análisis funcional del sistema prototipo

El Nivel 1 genera 2 módulos, uno de control y el otro mecánico, en los cuales se representa todos los procesos involucrados en el diseño de la máquina. En la Figura 8 se presenta el Nivel 1.

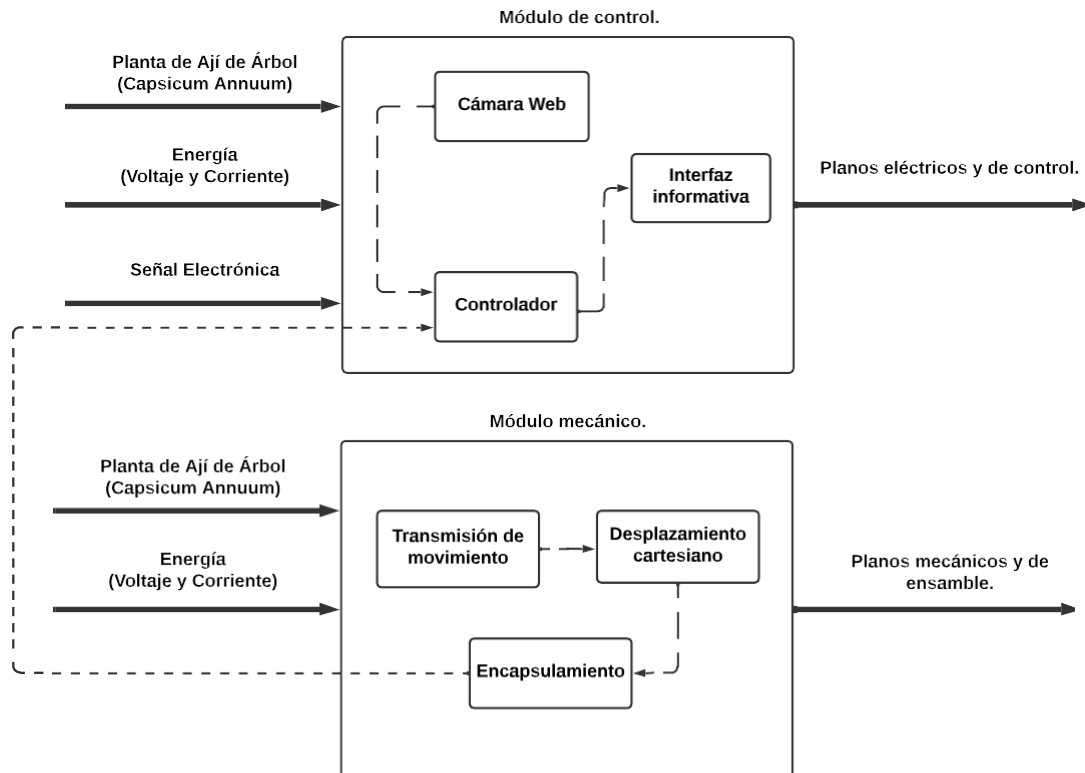


Figura 8. Diagramación de los módulos del Nivel 1 del análisis funcional del sistema prototipo

Con el Nivel 1 desarrollado, se plantea el Nivel 2 el cual se encuentra constituido por las partes conformantes del Nivel 1, siendo estos el módulo 1 de desplazamiento cartesiano, el módulo 2 que corresponde al encapsulamiento de la planta y el módulo 3 el proceso de examinación. En la Figura 9 se pueden apreciar los módulos mencionados en el Nivel 2.

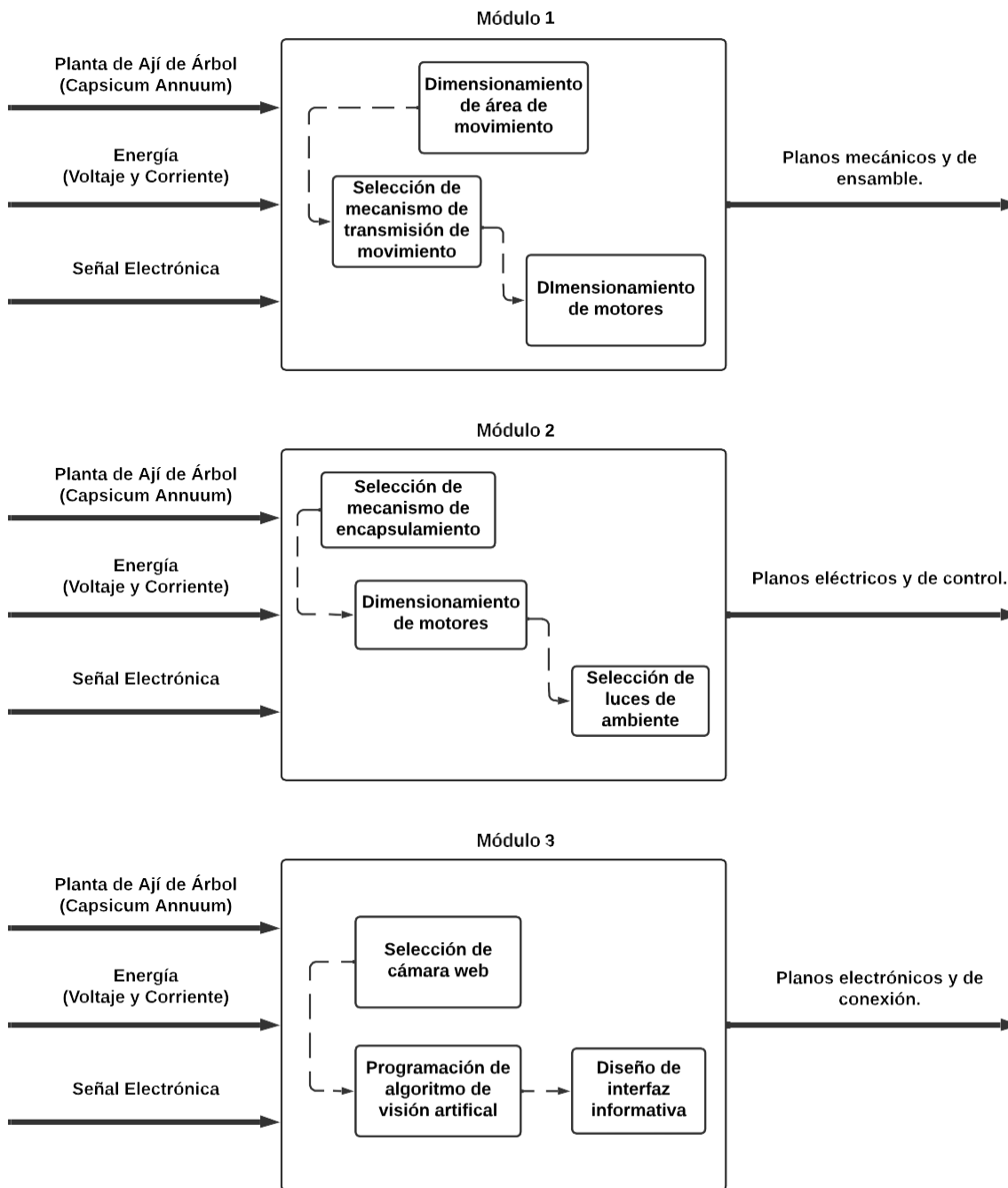


Figura 9. Diagramación de los módulos del Nivel 2 del análisis funcional del sistema prototipo

7.3. Matriz Morfológica

La matriz morfológica es una herramienta que muestra las diferentes alternativas disponibles para satisfacer los requisitos del sistema prototipo. Al conocer estas opciones, se generan diversas combinaciones utilizando las soluciones proporcionadas por los módulos funcionales del sistema. A partir de estas combinaciones, se debe elegir la opción que me-

por se ajuste al proyecto en cuestión. Dentro del Anexo B se encuentra disponible una tabla que muestra las distintas opciones de la matriz morfológica, así como las cuatro alternativas obtenidas a partir de dicha tabla.

7.4. Matriz de Residuos Ponderados

La matriz de residuos ponderados tiene como objetivo identificar la opción más óptima para el proyecto entre las alternativas generadas en la matriz morfológica. Esta selección se lleva a cabo utilizando criterios de evaluación específicos, los cuales se detallan en el Anexo C. En dicho anexo también se establece la prioridad de cada criterio y se realiza la comparación de cada alternativa en función de cada criterio. Los resultados de la evaluación de los cuatro criterios de ponderación, a los cuales se les asigna una letra de A a D, se muestran en la Tabla 2 para cada una de las alternativas.

Como resultado la Alternativa 1 con un valor de 0.295 es la mejor opción para el diseño de la máquina. Además se observa que la Alternativa 4 se encuentra como segunda opción con un valor de 0.283. En la Tabla 3 indica el significado de las letras asignadas a los criterios de ponderación. Las 4 alternativas se las presenta en la Figura 10, donde A es la Alternativa 1, B la Alternativa 2, C la Alternativa 3 y D la Alternativa 4.

Tabla 2. Análisis de Alternativas del Sistema Prototipo

| | A | B | C | D | | Prioridad |
|---------------|----------|----------|----------|----------|-------|------------------|
| Alternativa 1 | 0.096 | 0.048 | 0.040 | 0.055 | 0.239 | 1 |
| Alternativa 2 | 0.029 | 0.069 | 0.023 | 0.088 | 0.209 | 3 |
| Alternativa 3 | 0.054 | 0.089 | 0.052 | 0.029 | 0.224 | 2 |
| Alternativa 4 | 0.038 | 0.019 | 0.076 | 0.042 | 0.175 | 4 |

Tabla 3. Criterios de Ponderación y sus respectivas asignaciones de variables

| ASIGNACIÓN | CRITERIOS |
|-------------------|------------------------------------|
| A | Eficiencia Mecánica |
| B | Precisión de examinación |
| C | Seguridad de operación |
| D | Integridad del área de examinación |

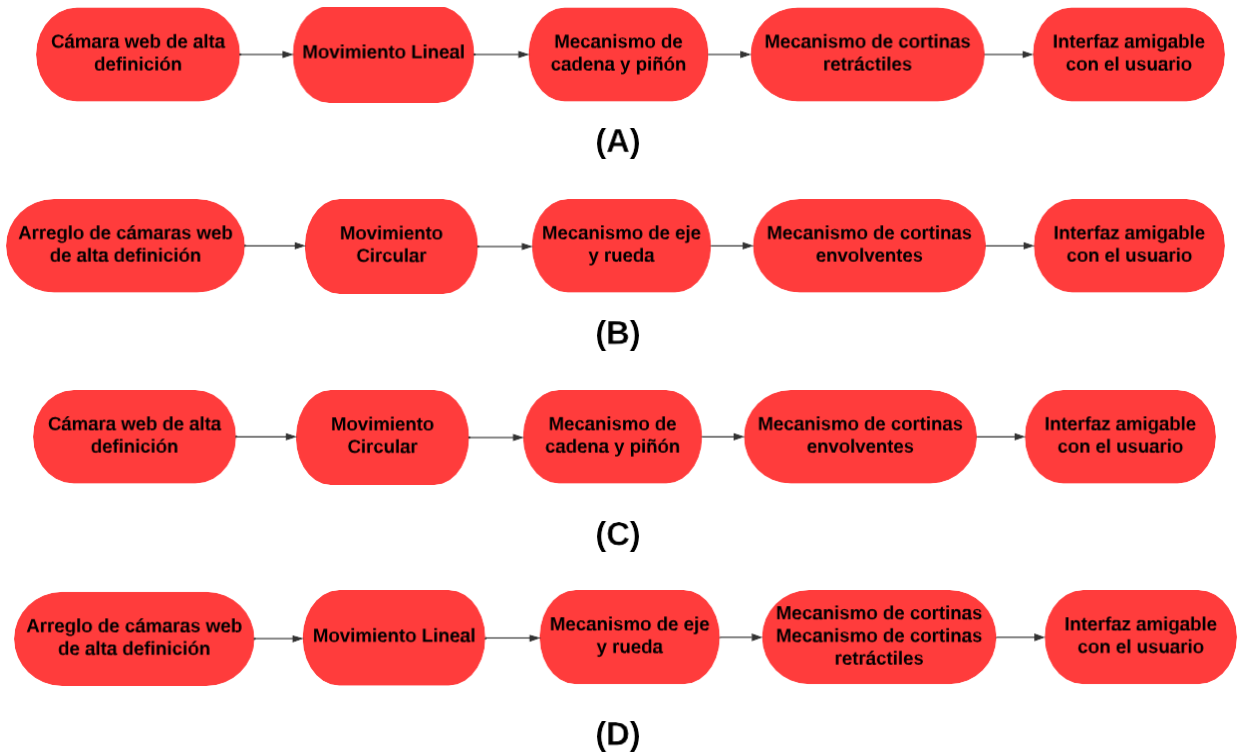


Figura 10. Alternativas matriz de residuos ponderados

8. Diseño Mecánico

A partir del resultado obtenido en la matriz de residuos ponderados, se inicia el proceso de dimensionamiento de los elementos mecánicos que forman parte del sistema prototipo a través de cálculos matemáticos. En la Figura 11 se muestran las distintas partes que conforman la alternativa seleccionada.

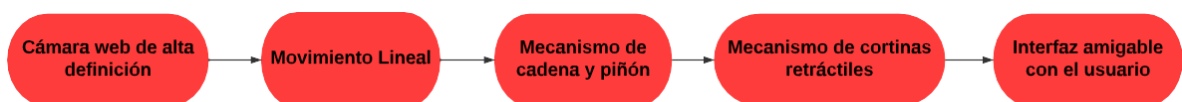


Figura 11. Alternativa seleccionada de la matriz de residuos ponderados

El sistema prototipo presentado en este documento estará conformado por una cámara web de alta definición colocado dentro de un área de especifica con ambiente controlado con un mecanismo de cortinas retráctiles que, mediante el movimiento lineal cartesiano de un carro X e Y, se ubicará sobre una planta de ají. Esta descripción corresponde a la alternativa seleccionada para su desarrollo. Véase Figura 12.

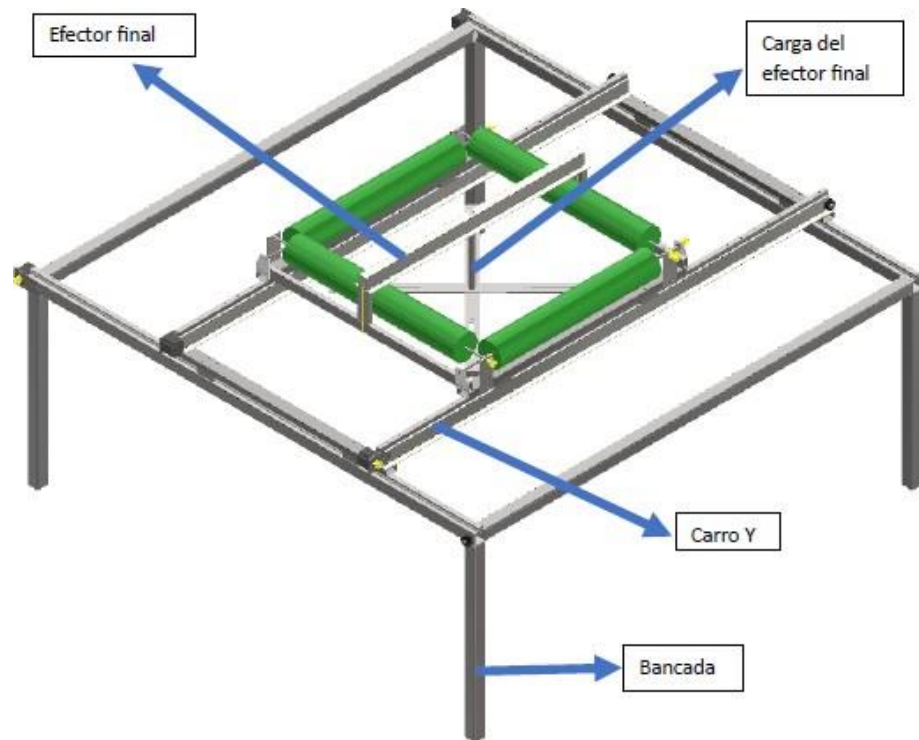


Figura 12. Bosquejo del sistema prototipo mecatrónico de examinación propuesto bajo la alternativa seleccionada.

Se toma como punto de partida el dibujo mecánico del efector final, el cual tiene como objetivos los siguientes puntos:

- Moverse en los ejes coordenados X e Y.
- Tener un sistema automático para el encapsulamiento visual de la planta.
- Tener un mecanismo para la regulación de posición de las cámara de examinación sobre la planta.

En la Figura 13 se muestra el boceto del efector final, el cual se encuentra compuesto por el carro móvil cartesiano X e Y junto a un subsistema de cortinas retráctiles para el encapsulamiento visual de las plantas Capsicum.

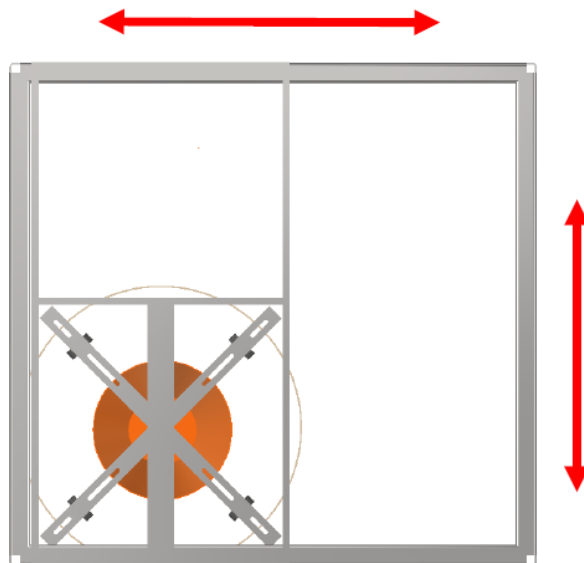


Figura 13. Vista superior del modelo CAD del sistema prototipo.

Las Figuras 14 y 15 ilustran los rollos de cortina ubicados en cada lado para el encapsulamiento visual de las plantas.

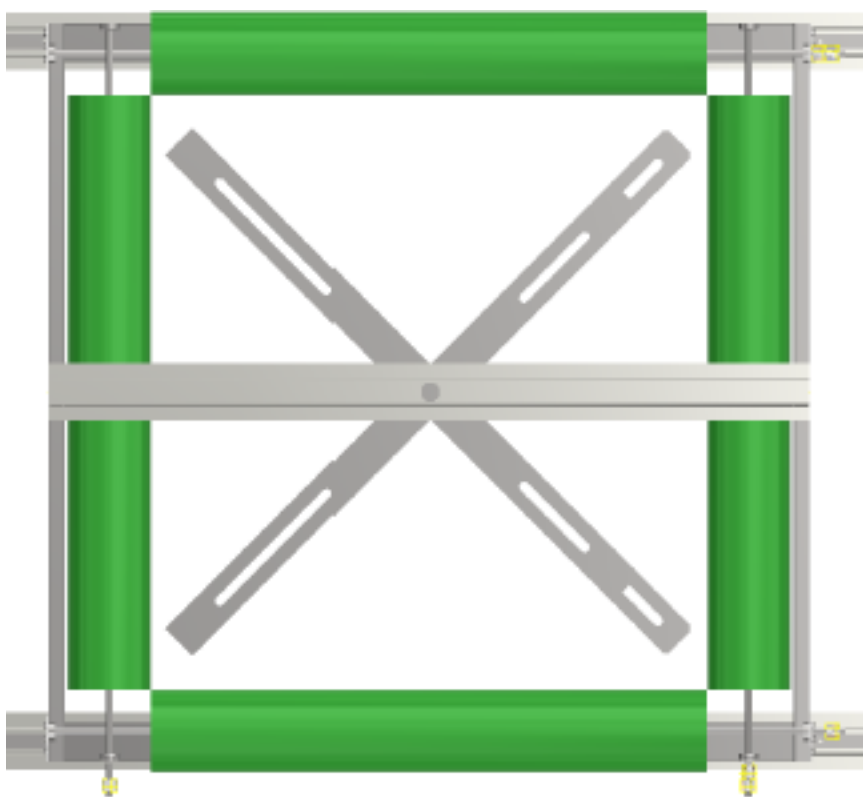


Figura 14. Sistema de encapsulamiento visual de las plantas de ají (Vista Superior)



Figura 15. Sistema de encapsulamiento visual de las plantas de ají (Vista Frontal)

Con este primer boceto se procede a perfeccionar la idea del sistema de encapsulamiento visual, debiendo ser:

- Fácil de fabricar, montar y reparar.
- Fácil de usar, bajo coste y con materiales accesibles en el mercado ecuatoriano.

8.1. Análisis y Dimensionamiento Geométrico

Se parte del requerimiento geométrico para un área de reconocimiento de una planta de ají *Capsicum Annum*, estimando un valor de 90 cm medidos diagonalmente. Con esto, se determina el valor de las aristas de la bancada del sistema prototipo aplicándolo en la ecuación (1). La Figura 16 muestra la representación del área deseada. (1).

$$r^2 = a^2 + b^2 \quad (1)$$

Donde

r hipotenusa del cuadrado en cm;

a arista 1 del cuadrado, en cm;

b arista 2 del cuadrado, en cm.

Despejando y reemplazando en la ecuación (1) se obtiene:

$$a = b$$

$$r^2 = 2a^2$$

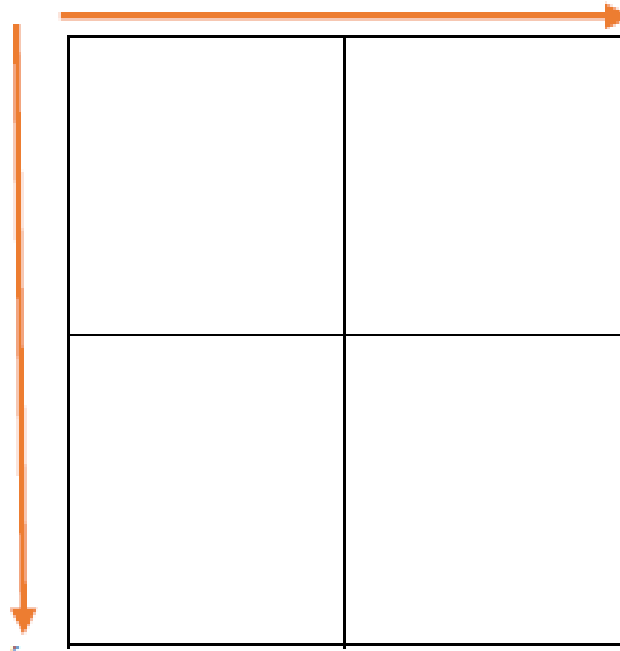


Figura 16. Área total Ideal para la examinación de la planta

$$a = \sqrt{\frac{r^2}{2}}$$

$$a = 63,63 \text{ cm}$$

Con el tamaño de la arista del cuadrado se puede obtener el valor del área total funcional de los recorridos en el plano cartesiano XY del sistema prototipo. Al ser un área cuadrada la obtención del valor de la arista total se lo realiza con el cálculo de la ecuación (2) con la que se calcula el área total ideal para la examinación de la planta de ají.

$$a_t = 2a \quad (2)$$

$$a_t = 2a = 127 \text{ cm}$$

Idealmente, la medida de la arista es la indicada anteriormente, ahora se debe tener en consideración, la colocación de los motores, la transmisión y el mecanismo del efector final para el recubrimiento de la planta, y por último se ha determinado la altura de la estructura en 80cm.

8.2. Análisis y Dimensionamiento del Sistema de Encapsulamiento de Plantas

Al preferirse el uso de cortinas retráctiles con sistema de apertura enrollable, para su dimensionamiento es necesario saber el diámetro del rollo de la cortina con el fin de establecer las dimensiones finales del efector final, y por ende de la estructura total. Se tiene como premisa el diámetro de la flecha que va a soportar el rollo de cortina y también se determina el largo que la cortina debe desplegarse para encapsular a la planta. Se parte del concepto de perímetro de un círculo y el largo que se requiere, estando este en función del espesor del material de la cortina se tiene la ecuación (3).

$$p_o = 2 \cdot \pi (r + e)^2 \quad (3)$$

Donde:

p_o perímetro del rollo de la cortina en m;

r radio del rollo de la cortina en m;

e largo de la cortina en m.

Despejando r y determinando que el espesor del material de la cortina enrollable es 0,02 m, se obtiene:

$$0 = r^2 + (2 \cdot e \cdot r) - \frac{p_o - (2 \cdot \pi \cdot e^2)}{2 \cdot \pi}$$

$$r = \frac{-2 \cdot e \pm \sqrt{(2 \cdot e)^2 - 4 \cdot (1) \cdot \left(-\frac{p_o - 2 \cdot \pi \cdot e^2}{2 \cdot \pi}\right)}}{2 \cdot (1)}$$

$$r = \frac{-2 \cdot (2) \pm \sqrt{(2 \cdot (0,02))^2 - 4 \cdot (1) \cdot \left(-\frac{0,7 - 2 \cdot \pi \cdot (0,02)^2}{2 \cdot \pi}\right)}}{2 \cdot (1)}$$

$$r = 0,035 \text{ m}$$

Con esto, se obtiene un diámetro total del rollo de cortina de 0.7 m y es posible reestructurar las medidas geométricas tomadas desde un principio, obteniéndose el dibujo semi final del prototipo. La figuras 17 y 18 muestra las medidas y la geometría final del sistema prototipo

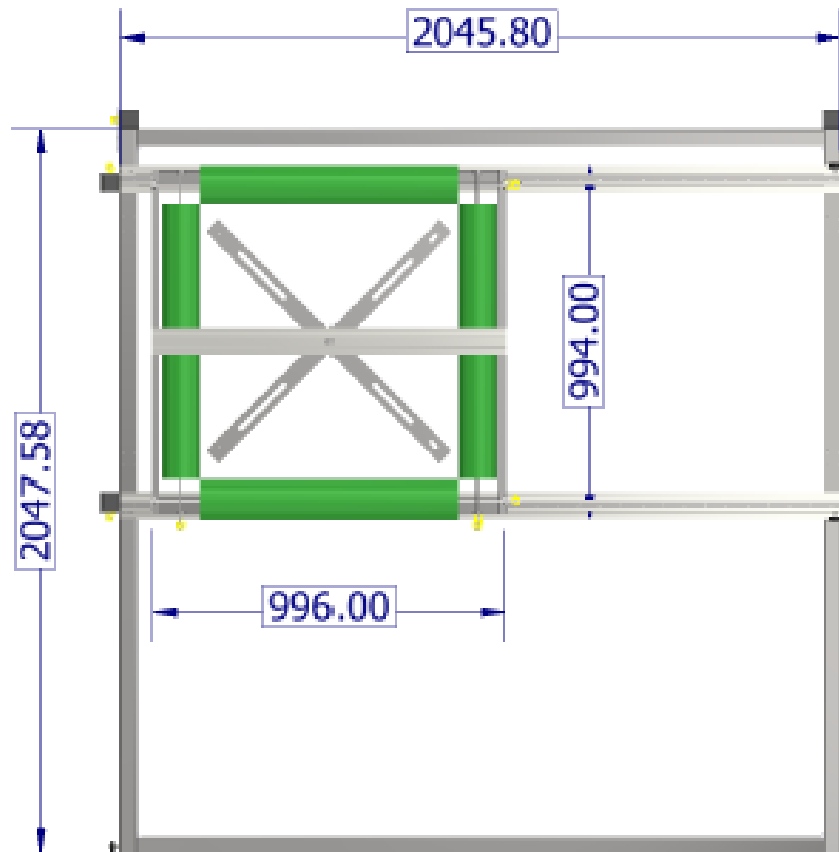


Figura 17. Geometría final del sistema prototipo (Vista Superior)

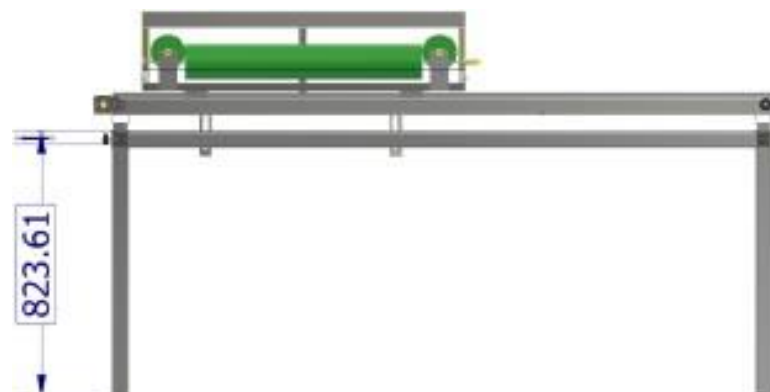


Figura 18. Geometría final del sistema prototipo (Vista Frontal)

Establecidos los sistemas necesarios para el prototipo, la geometría y la disposición y montaje de los componentes se procede al cálculo final por los elementos finitos de la estructura. Es importante indicar y establecer nombres para cada sistema que comprende al prototipo, esto con el fin de dejar claro el cálculo estructural que se debe realizar, para

la posterior selección de materiales de ingeniería y de manufactura, la Figura 19 ilustra el sistema prototipo.

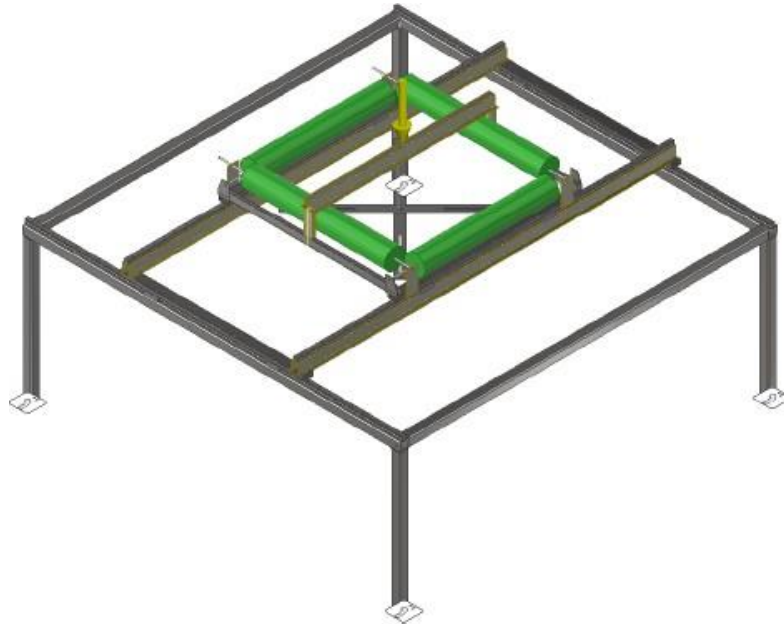


Figura 19. Geometría final global del sistema prototipo

8.3. Cálculo Estructural del Sistema Prototipo

Para el cálculo estructural se parte de la determinación de las propiedades mecánicas del material, en este caso se utilizará, para la fabricación, acero, que será determinado por geometría, modulo resistente, esfuerzos y deformaciones máximas. En el caso de las deformaciones máximas, al ser una prototipo con movimientos lineales coordinados exactos se define como máximo 0.5 mm de deflexión máxima en todos sus componentes. Se propone este valor como referente de los valores máximos de las deflexiones de los componentes del sistema obtenidos mediante software de simulación. Véase la Tabla 9.

De este modo se procede a la simulación repetitiva con el método de los elementos finitos y el uso del catalogo de perfiles DIPAC (Anexo 1). Cumpliendo los siguientes requisitos:.

- Deflexión máxima <0,5mm
- Esfuerzo máximo de Von Mises menor al límite elástico del material.

En a figura 20 se muestra el dibujo CAD final del efector final móvil, en este se indican las

restricciones de Dirichlet para la restricción de los grados de libertad del sistema y la fuerza aplicada para simular su comportamiento estático.

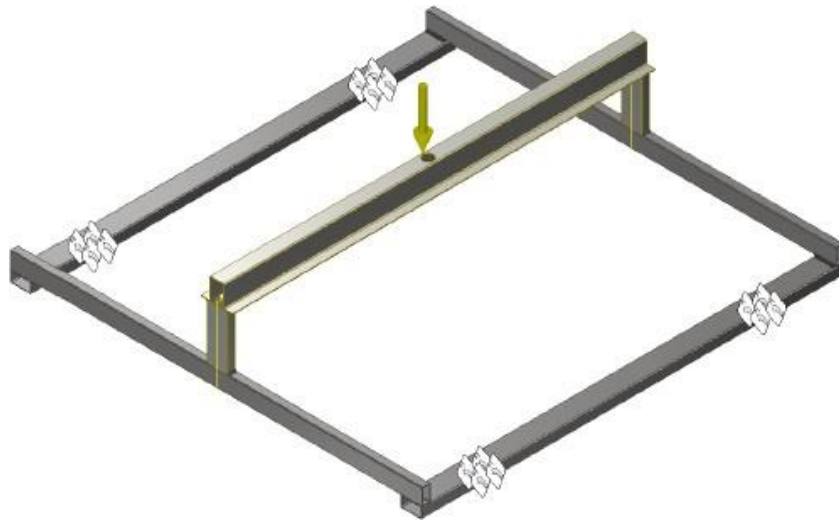


Figura 20. Restricciones y aplicación de carga para el efector.

Previa simulación es importante determinar las características mecánicas del material, en este caso se usó las propiedades del acero A36, la tabla 4 indica los valores para la simulación [5].

Tabla 4. Características mecánicas del acero

| CARACTERÍSTICA | VALOR |
|---------------------|------------------------|
| Módulo de Young | 2,1 GPa |
| Poisson | 0,3 |
| Límite elástico | 207 MPa |
| Límite a la tensión | 345 MPa |
| Densidad | 7,85 kg/m ³ |

También es importante indicar el tipo de mallado utilizado en la simulación, y el número de elementos, en la tabla 5 se indican estos valores.

Tabla 5. Características de los elementos finitos

| CARACTERÍSTICA | VALOR |
|----------------------|-----------|
| Elemento | SOLID 187 |
| Tamaño del elemento | 0,2 |
| Máximo grado de giro | 60° |

Y por último, es importante señalar el valor de la carga, en este caso se utilizó simplemente el valor de la sumatoria de la masa de los componentes que van a estar soportados

por esta estructura de modo que se tiene un valor de $12,52\text{Kg} \approx 13\text{Kg}$, la tabla 6 indican los componentes y sus valores de masa.

Tabla 6. Valores de componentes anclados al efector final

| COMPONENTE | VALOR kg | CANTIDAD | TOTAL kg |
|----------------------|----------|----------|----------|
| Platina 1 | 0,96 | 2 | 1,92 |
| Platina 2 | 0,475 | 4 | 1,9 |
| Eje conector | 1,2 | 1 | 1,2 |
| Perfil Omega | 2,74 | 1 | 2,74 |
| Perfil rectangular 1 | 0,16 | 2 | 0,32 |
| Cámara Web | 0,4 | 1 | 0,4 |
| Tornillería | 0,5 | 1 | 0,5 |
| Perfil rectangular 2 | 1,768 | 2 | 3,53 |

Con estas definiciones, se procede a la simulación del efector móvil, la figura 7 muestra los resultados de la simulación indicando el máximo valor de esfuerzo de Von Mises.

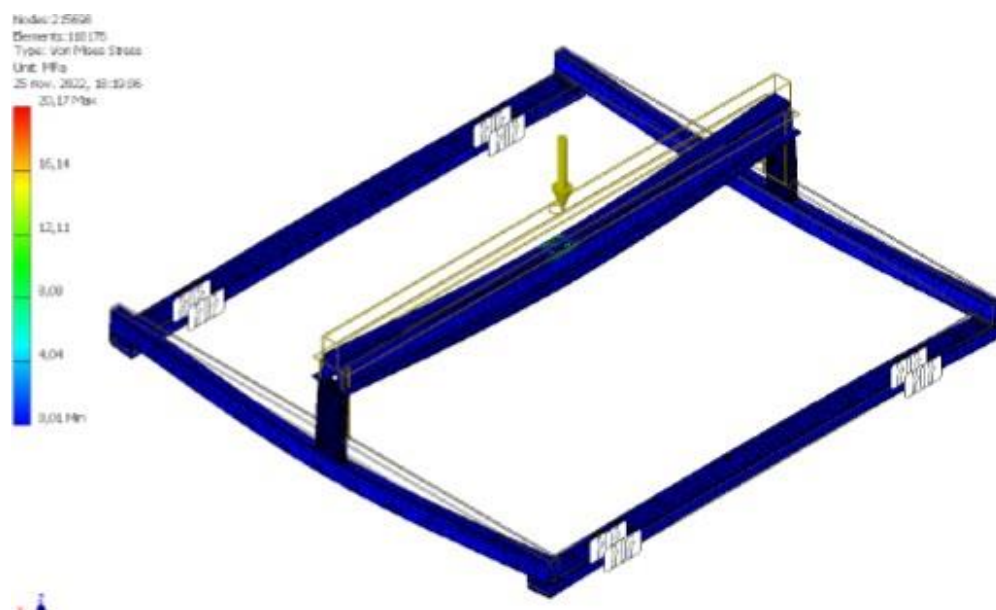


Figura 21. Esfuerzo máximo de Von Mises en el efector móvil

En la Figura 22 se muestran los resultados de la deflexión máxima tras la aplicación de la carga, indicando un valor máximo de 0.15mm , cumpliendo con los objetivos ya definidos

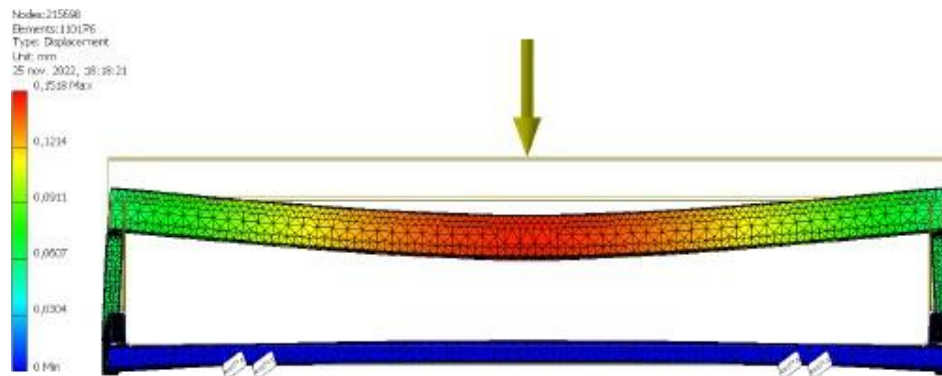


Figura 22. Deflexión máxima en el efector móvil

Definidos los valores de masa del efector final y viendo que cumple con los objetivos de diseño tanto en deflexión y esfuerzo máximos de Von mises dentro del comportamiento elástico del acero, se procede a simular el carro X e Y, el cual debe soportar todo este sistema, añadido el mecanismo de encapsulamiento visual, en la tabla 7 se muestran los valores de las masas añadidas.

Tabla 7. Valores de masa para el Carro Y

| COMPONENTE | VALOR kg | CANTIDAD | TOTAL kg |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| Carga del Efector Final | 13 | 1 | 13 |
| Perfil Omega 2 | 5,76 | 2 | 11,52 |
| Rodamientos lineales | 0,3 | 4 | 1,2 |
| Guías Lineales | 5,07 | 2 | 10,14 |
| Rollos de Cortina 1 | 3,5 | 4 | 14 |
| Motores NEMA 23 | 1,5 | 2 | 3 |
| Tornillería | 0,8 | 1 | 0,80 |

La tabla 8 contempla los valores de masa totales que debe soportar el carro X e Y mostrado en la figura 9 este nos indica las restricciones de Dirichlet, así como también las cargas puntuales ubicadas exactamente en el centro del mecanismo, ya que en ese punto es donde de tienen las deflexiones máximas, a pesar de que el sistema va a funcionar siempre en las cuatro esquinas del área de trabajo

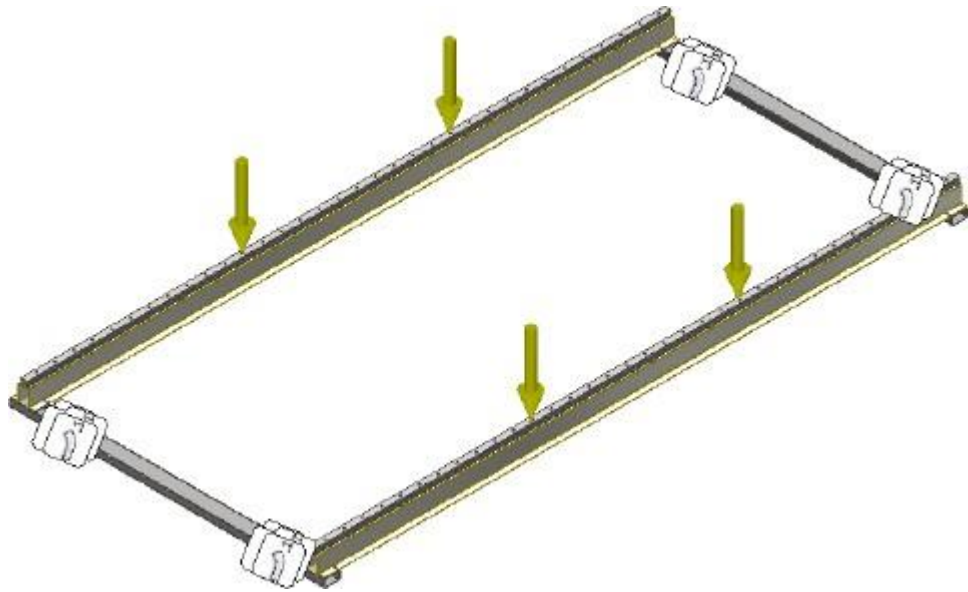


Figura 23. Aplicación de fuerzas y cargas para el Carro X e Y

Tras la simulación, utilizando las mismas propiedades mecánicas del material, así como también las mismas características de los elementos finitos, la figura 24 muestra los resultados del esfuerzo máximo para el carro X e Y

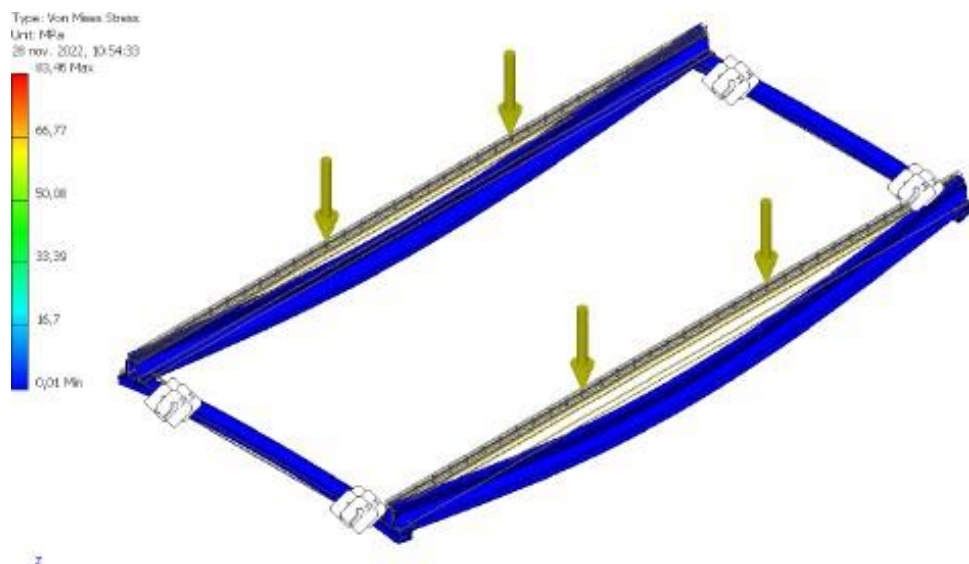


Figura 24. Esfuerzo máximo de Von Mises para el Carro X e Y

Obteniendo un resultado favorable, con un valor máximo de esfuerzo de 83,46 MPa, estando así dentro del comportamiento elástico del acero seleccionado. La figura 25 nos

muestra los resultados de la deflexión máxima, con un valor máximo de 0.44mm, que también cumple dentro de los objetivos establecidos.

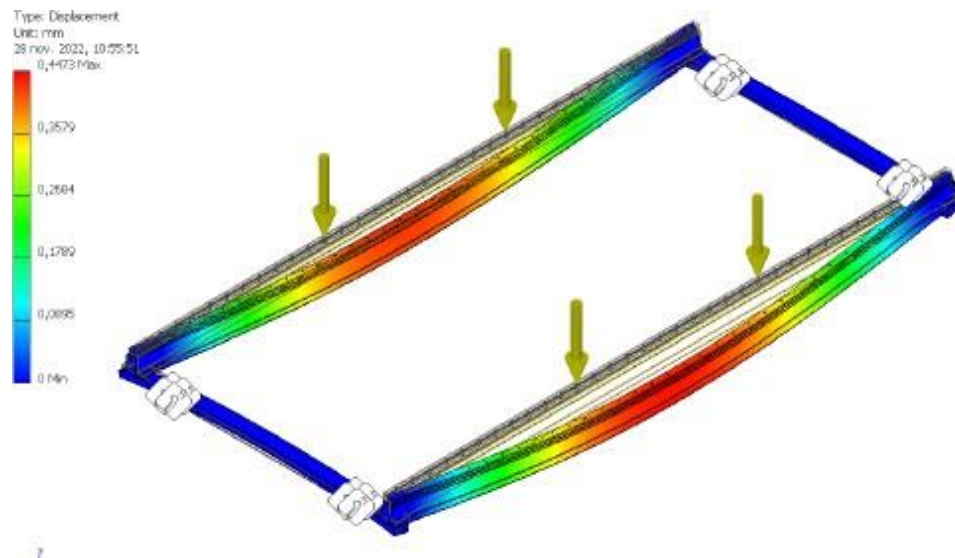


Figura 25. Deflexión máxima para el Carro X e Y

Tras haber obtenido resultados favorables, se procede a simular el último sistema del prototipo, la bancada, para esto se indican en la tabla 8 los pesos muertos añadidos a los ya definidos en los sistemas anteriores para una simulación precisa.

Tabla 8. Valores de masa totales para la bancada

| COMPONENTE | VALOR kg | CANTIDAD | TOTAL kg |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| Carga total del Carro Y | 53,66 | 1 | 53,66 |
| Perfil rectangular 2 | 1,689 | 2 | 3,37 |
| Rodamientos lineales | 0,3 | 4 | 1,2 |
| Guías Lineales | 5,07 | 2 | 10,14 |
| Perfil Cuadrado 1 | 8,43 | 2 | 16,86 |

Con el valor total de la masa que debe soportar la bancada $85,23\text{kg} \approx 86\text{Kg}$, se definen las restricciones de Dirichlet y se ubican exactamente las cargas en la bancada, la figura 26 indica esta disposición.

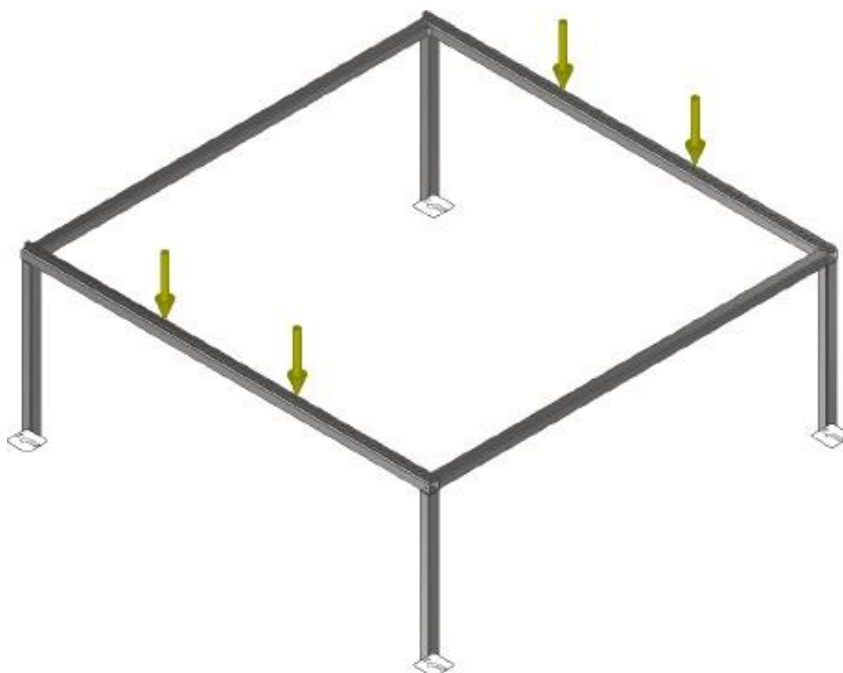


Figura 26. Restricciones y cargas de la bancada de soporte

Tras la ejecución de la simulación por los elementos finitos, la figura 27 nos indica los resultados de esfuerzos máximos sobre la estructura.

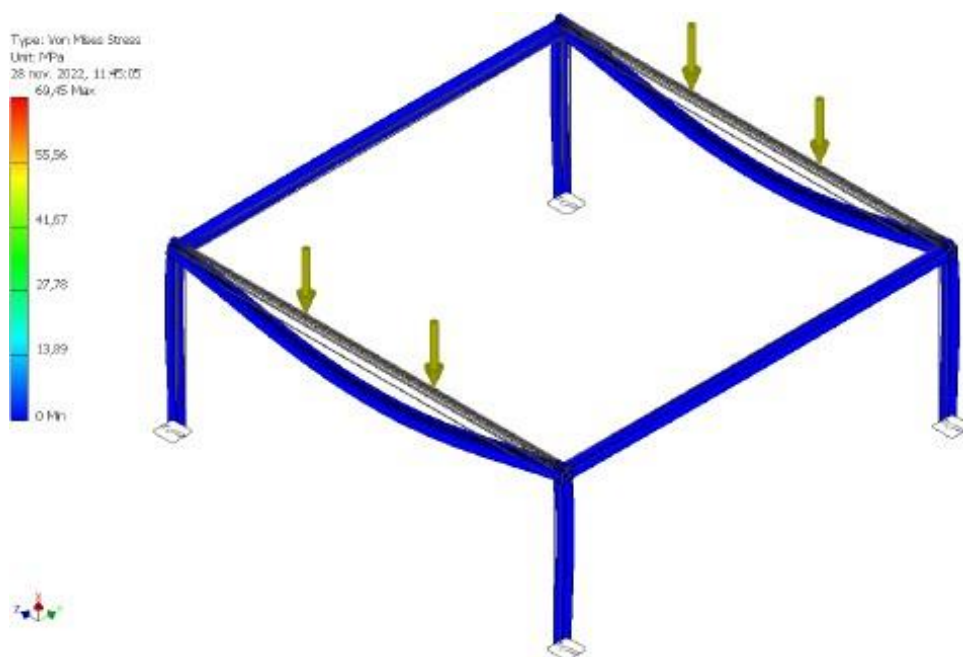


Figura 27. Esfuerzo máximo de Von Mises para la bancada

Con valores de 69,45 MPa, la bancada soporta y esta dentro del comportamiento elástico del acero, por consiguiente, en la figura 28 se indican los valores máximos de deflexión de la estructura,

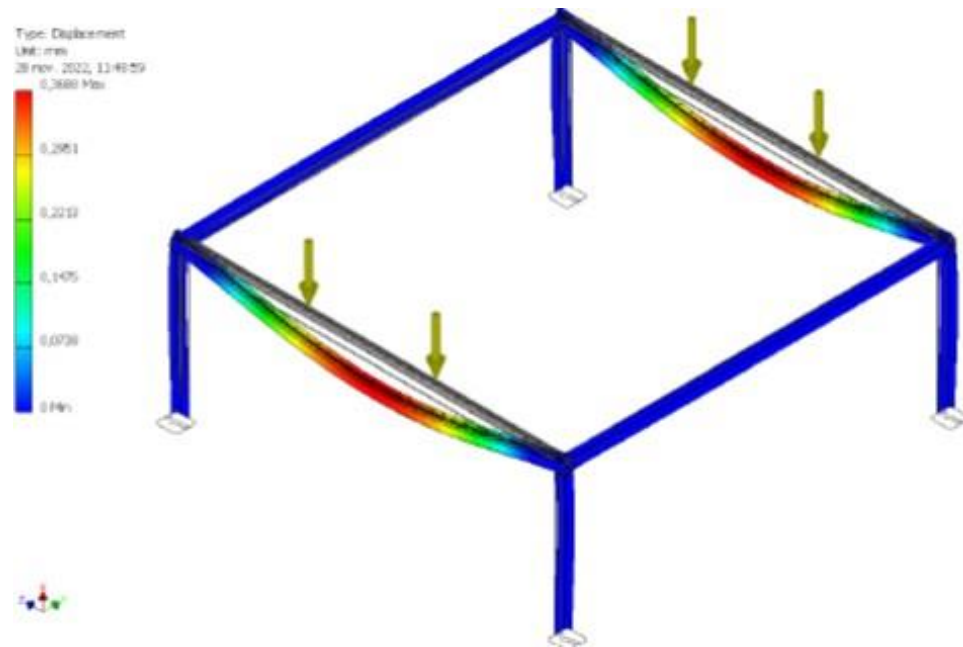


Figura 28. Deformación máxima de la bancada

Obteniendo como máximo 0.36mm de deflexión, valores dentro del rango contemplado. Tras estas simulaciones podemos determinar que el prototipo cumple con los objetivos técnicos planteados, para su funcionamiento ideal y funcional. Ahora se deben considerar y determinar los puntos débiles del prototipo, para poder así indicar precauciones de uso, así como también cargas máximas permitidas antes del fallo de algún componente, de este modo se realiza una simulación por los elementos finitos de la estructura total, considerando de que un operario se arrime en la estructura en el punto mas crítico que es en la mitad de la estructura, netamente en el efector final. La figura 29 indica la posición de la carga, suponiendo que un operario de 80Kg se suba encima de la estructura.

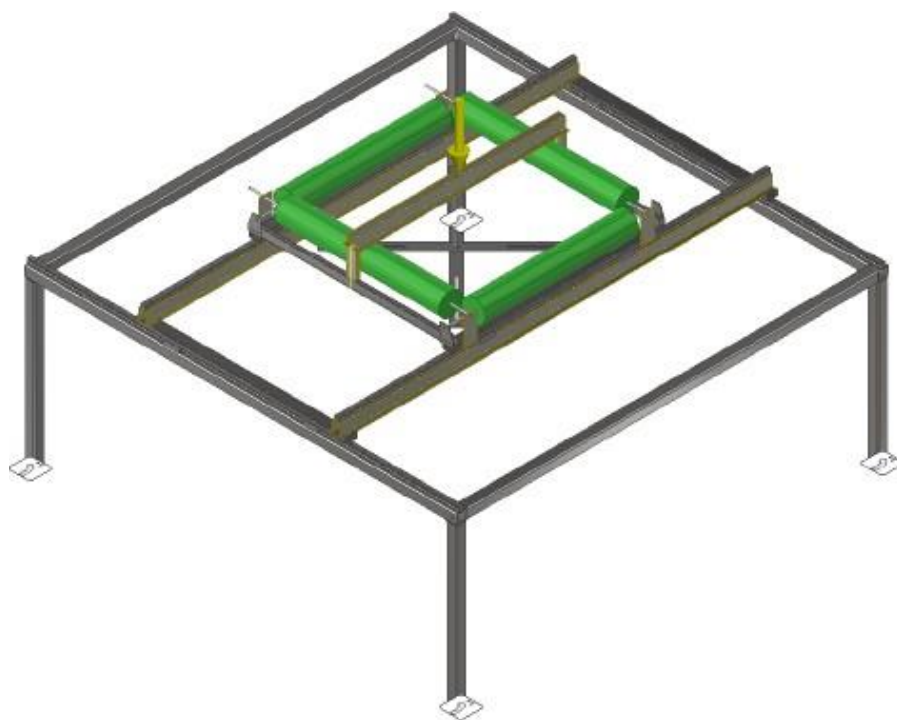


Figura 29. Restricciones y carga accidental sobre estructura del prototipo

La figura 30 indica el valor máximo de esfuerzo tras la aplicación de esta carga

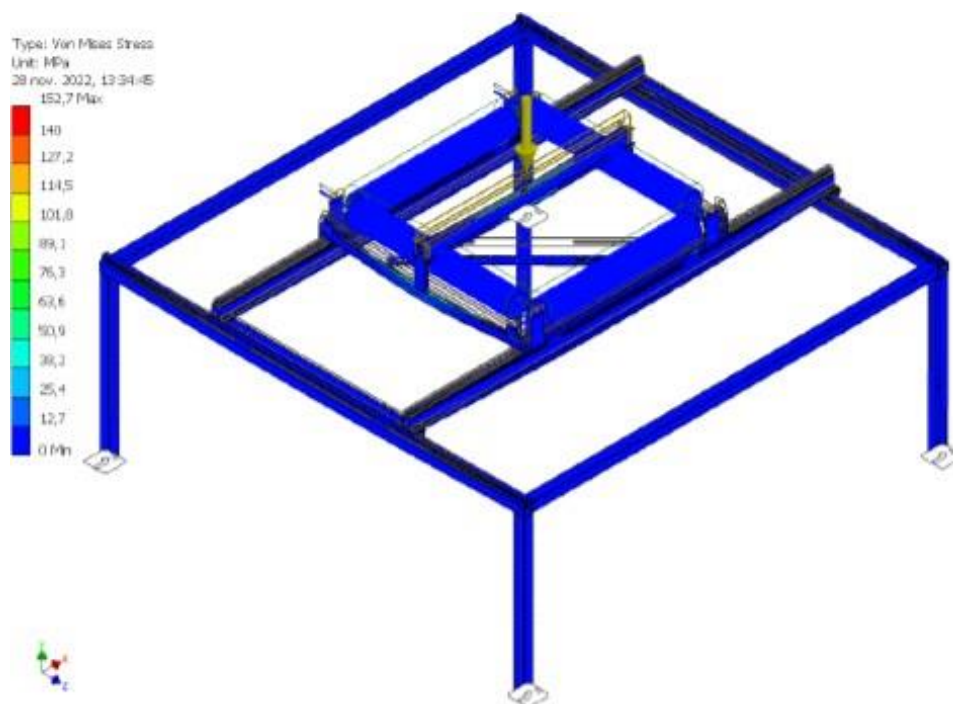


Figura 30. Esfuerzo máximo de Von mises máxima de carga accidental del prototipo

La figura 31 indica el valor máximo de deflexión, con la aplicación de la carga

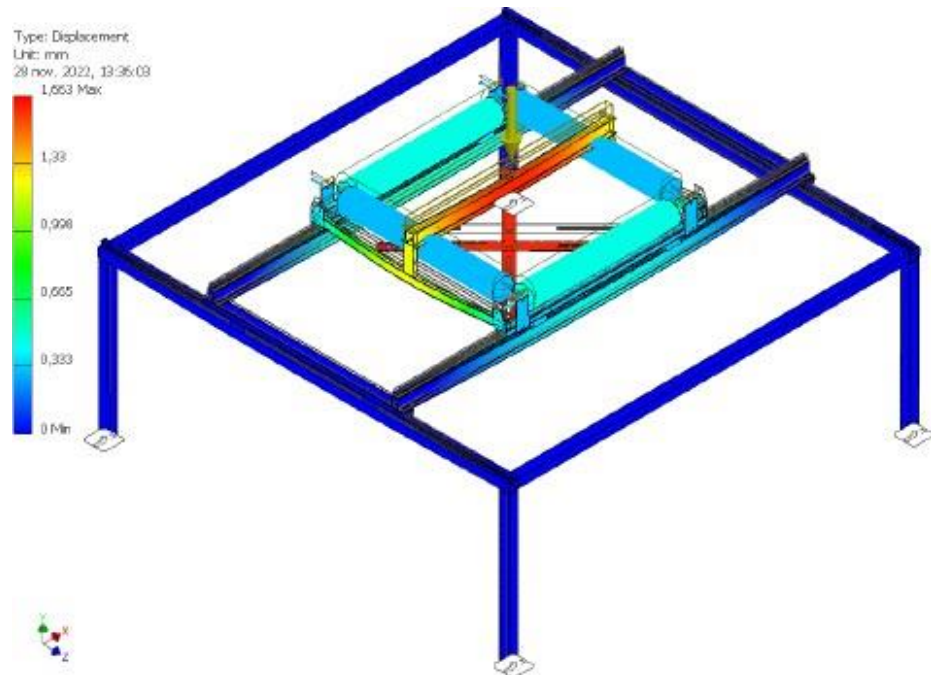


Figura 31. Deflexión máxima de carga accidental del prototipo

Tras las simulaciones el prototipo aguanta la carga, pero no cumple con el valor de deflexión máxima permitida para su correcto funcionamiento, aun que esta dentro del comportamiento elástico del acero, de todas formas, es necesario indicar lo puntos en donde el esfuerzo es máximo.

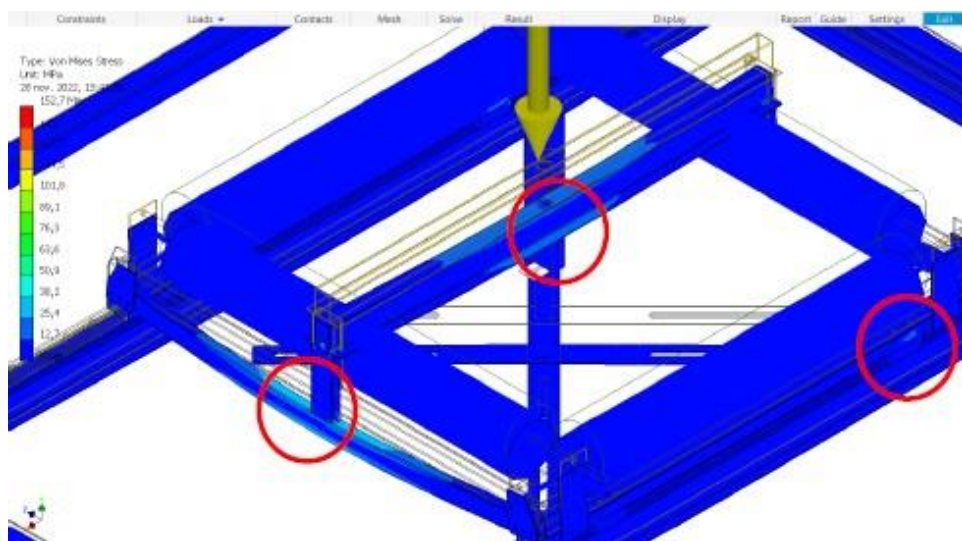


Figura 32. Puntos débiles de la estructura a ser considerados

La figura 33 muestra los puntos con mayor esfuerzo, siendo estos:

- La unión soldada para el efector final
- La unión entre los perfiles y los rodamientos lineales.
- El perfil omega del efector final

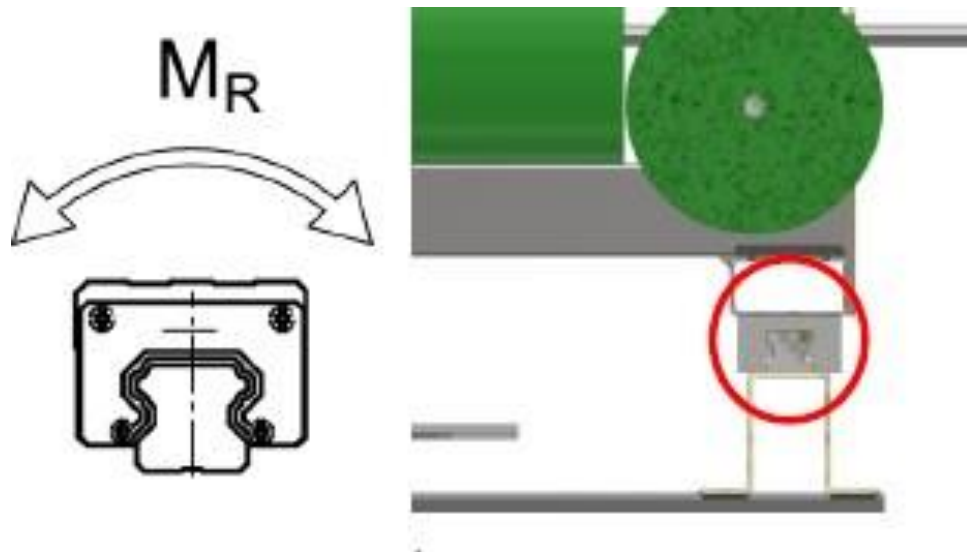


Figura 33. Momento máximo en los rodamientos lineales

Teniendo en consideración, la distancia entre la carga y el rodamiento se tiene:

$$M = F \cdot d \quad (4)$$

Donde:

- M Momento de la carga aplicada en Nm;
 F Fuerza ejercida por la carga en N;
 d distancia de recorrido en m.

$$M = \frac{\text{Carga}}{4} \cdot d$$

$$M = \frac{800 \text{ N}}{4} \cdot 0,485 \text{ m}$$

$$M = 97 \text{ Nm}$$

Cumple, pero está muy próximo a su valor de momento máximo, de modo que el rodamiento lineal es el limitante de carga obteniendo la carga máxima permisible en la estructura del prototipo:

$$F = \frac{M}{d}$$

$$F = \frac{120 \text{ Nm}}{0,485 \text{ m}}$$

$$F = 247,42 \text{ N}$$

Suponiendo que se coloca una carga por gravedad en ese punto, su masa máxima sería 25,24kg que en total aproximadamente 100,98kg, para el fallo del rodamiento. Tras los resultados obtenidos, en la tabla 9 se indican los valores resumidos de cada sistema, deflexión máxima y esfuerzos máximos obtenidos, con los valores objetivos del diseño del prototipo

Tabla 9. Resumen del comportamiento mecánico de la estructura tras la simulación por el método de elementos finitos

| SISTEMA | DEFLEXIÓN MÁXIMA mm | ESFUERZO MÁXIMO MPa | DEFLEXIÓN REQUERIDA | FACTOR DE SEGURIDAD |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Efactor Final | 0,15 | 20,17 | 0,5 | 9,91 |
| Carro Y | 0,44 | 83,46 | 0,5 | 2,39 |
| Bancada | 0,36 | 69,45 | 0,5 | 2,87 |
| Prototipo | 1,66 | 152,7 | 0,5 | 1,3 |

Los valores indicados en la tabla 6, están dentro del rango de funcionamiento normal e ideal del prototipo.

8.4. Cálculo de Motores

Para el cálculo de los motores de los movimientos en los ejes coordenados X e Y, es primordial indicar los valores de las masas que van a transportar en su funcionamiento, la tabla 10 indica estos valores.

Tabla 10. Valores de masa para los ejes X e Y

| SISTEMA | MASA kg | # MOTORES | MASA POR MOTOR kg | VALOR REFERENCIAL 20 % kg |
|---------------|---------|-----------|-------------------|---------------------------|
| Efactor Final | 0,15 | 20,17 | 0,5 | 9,91 |
| Carro X | 18 | 2 | 9 | 11 |
| Carro Y | 86 | 2 | 43 | 52 |

La figura 34 indica la posición de los motores en la estructura del prototipo

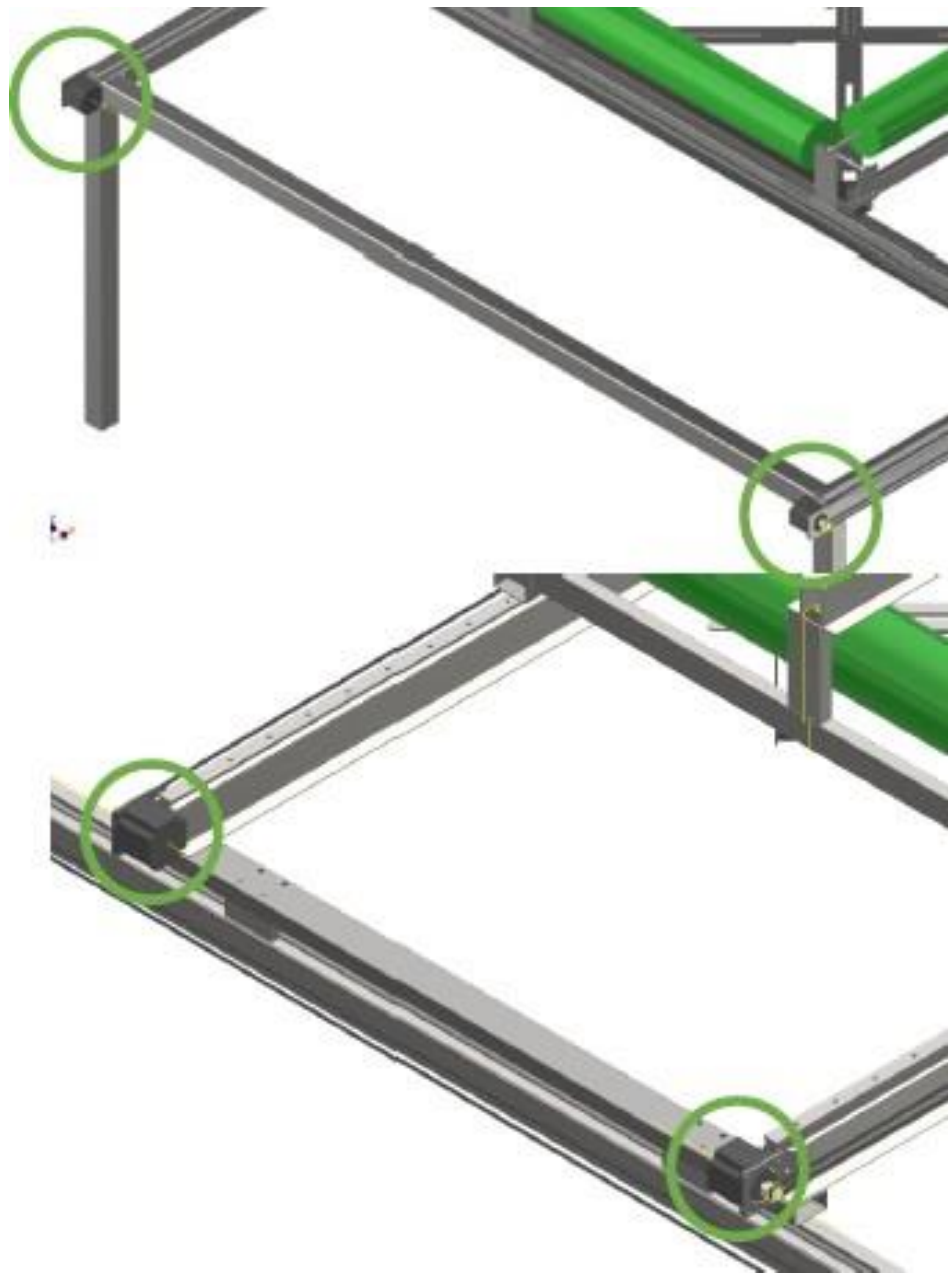


Figura 34. Localización de los motores para el movimiento en los ejes X e Y

Los cálculos se realizan considerando un valor mayor al que el motor tendría que trabajar, esto para resguardar su funcionamiento, y evitar posibles daños electrónicos o mecánicos

$$T_x = F_x \cdot r \quad (5)$$

Donde:

T_x torque del motor para el eje x en Nm;

F_x fuerza del motor en el eje x en N;

r distancia de recorrido en m.

$$T_x = 108 \text{ N} \cdot 0,04 \text{ m}$$

$$T_x = 4,3 \text{ Nm}$$

$$T_y = F_y \cdot r \quad (6)$$

Donde:

T_y torque del motor para el eje x en Nm;

F_y fuerza del motor en el eje x en N;

r distancia de recorrido en m.

$$T_x = 509,6 \text{ N} \cdot 0,04 \text{ m}$$

$$T_x = 20,38 \text{ Nm}$$

9. Dimensionamiento Electrónico

Es esencial tener conocimiento acerca de los elementos requeridos por la máquina al momento de seleccionar los componentes electrónicos. Esto implica la creación de un diagrama de bloques que representa las distintas partes que forman la máquina. La Figura 35 se presenta el diagrama de bloques.

Los componentes seleccionados para el funcionamiento y control de la máquina se los presenta a continuación.

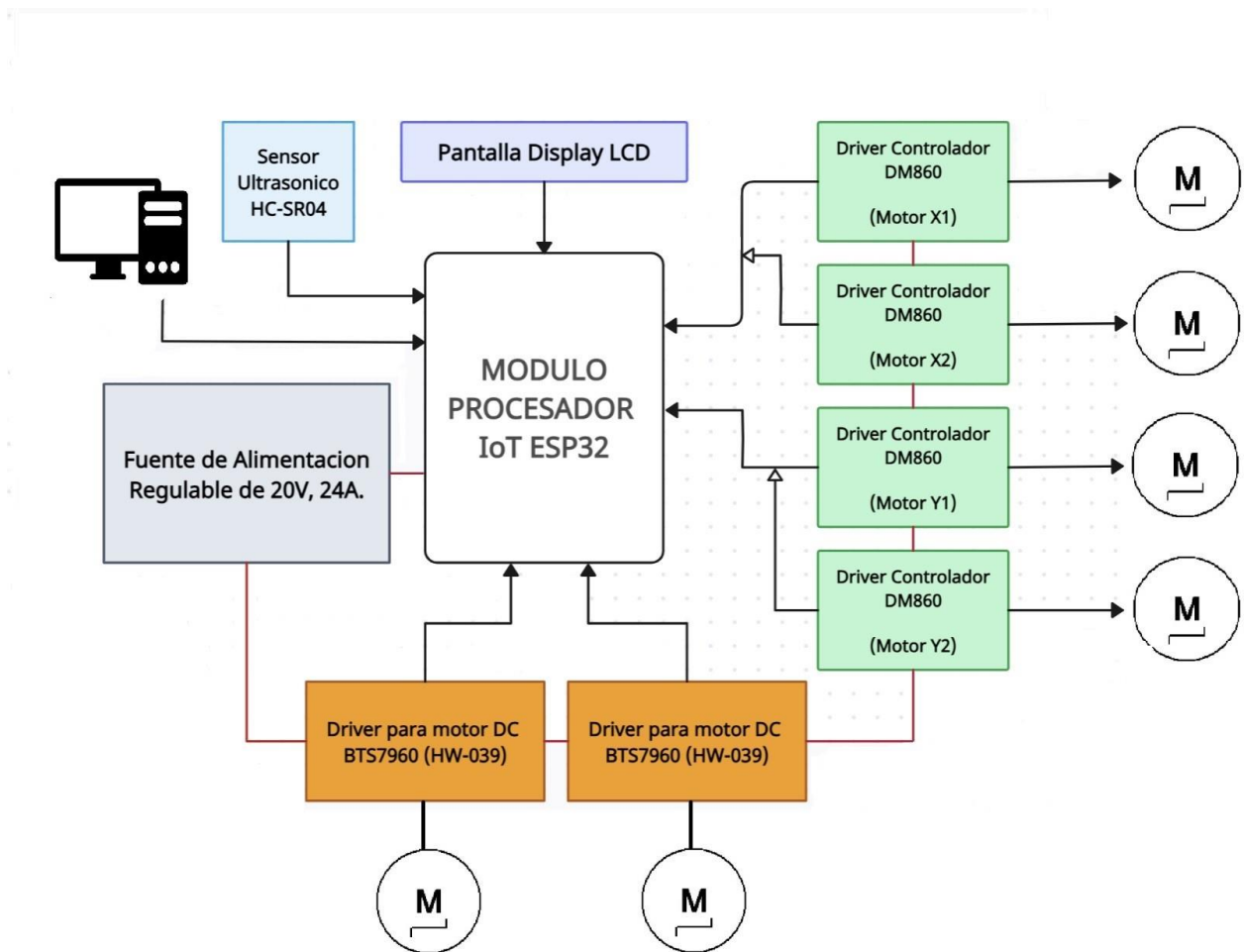


Figura 35. Diagrama de bloques para dimensionamiento electrónico

9.1. Módulo Procesador IoT ESP232

El módulo ESP32 es un dispositivo de desarrollo que se basa en el sistema en chip (SoC) ESP32, el cual integra un microcontrolador de doble núcleo, conectividad WiFi y Bluetooth. El ESP32 generalmente cuenta con una cantidad significativa de memoria flash y RAM incorporada, lo que es esencial para almacenar programas, datos y configuraciones. Debido a sus capacidades de conectividad y potencia de procesamiento, el ESP32 es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo proyectos de IoT, automatización del hogar, dispositivos portátiles, sistemas de monitoreo, desarrollo de aplicaciones, y más. Véase el dispositivo en la Figura 36.



Figura 36. Módulo Procesador IoT ESP232

En la figura 37 se puede apreciar la configuración física electrónica del elemento en mención.

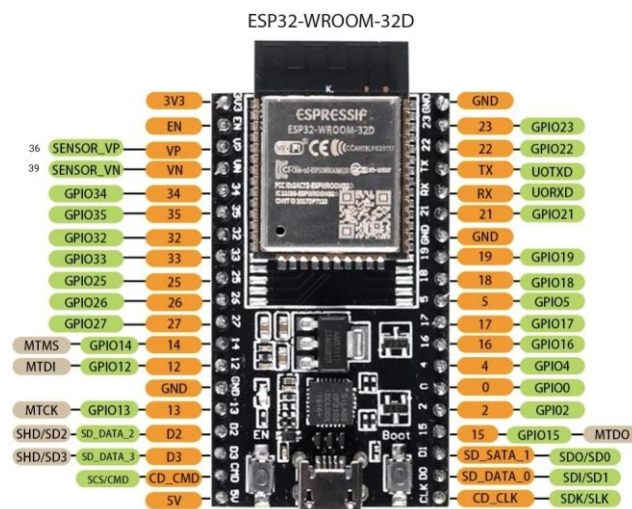


Figura 37. Configuración física electrónica del Modulo Procesador IoT ESP32

9.2. Motores a Paso NEMA 23

Los motores NEMA 23 son un tipo de motor paso a paso que se utiliza comúnmente en aplicaciones de control de movimiento. Estos motores se caracterizan por tener una brida de montaje cuadrada de 2.3 pulgadas (aproximadamente 57 mm) y un patrón de orificios de montaje estándar. Los motores NEMA 23 son conocidos por su alta precisión y torque, lo

que los hace adecuados para aplicaciones que requieren un control de movimiento preciso, como máquinas CNC (Control Numérico por Computadora), impresoras 3D, equipos de automatización y robótica. Estos motores se pueden controlar utilizando señales de pulso para moverlos en incrementos precisos, lo que permite un posicionamiento exacto y controlado. Se puede observar el motor seleccionado en la Figura 38. Para mayor información de las características del motor consultar [6].



Figura 38. Motor a pasos NEMA 23

9.3. Motores DC de 12 Voltios

Los motores de plumas de autos son compactos y generalmente se encuentran ubicados en la base del parabrisas, cerca del capó del vehículo. Están compuestos por un motor eléctrico, un mecanismo de engranajes y un brazo de accionamiento. El motor eléctrico proporciona la energía necesaria para hacer funcionar el mecanismo de engranajes, que a su vez transmite el movimiento al brazo del limpiaparabrisas. Se puede observar el motor seleccionado en la Figura 39. Para mayor información de las características del motor consultar [6].



Figura 39. Motor DC de plumas de autos

9.4. Driver Controlador DM860

El driver DM860 es un controlador de motor paso a paso de alta gama diseñado para proporcionar un control preciso y eficiente de motores paso a paso de alto voltaje y corriente. El DM860 es capaz de manejar corrientes de hasta 7.8 amperios y voltajes de alimentación de hasta 80 voltios. Está diseñado para aplicaciones que requieren un alto rendimiento y un control preciso del motor, como máquinas CNC, impresoras 3D, equipos de automatización industrial y sistemas de posicionamiento. El controlador DM860 utiliza tecnología de microstepping, lo que permite dividir cada paso del motor en pasos más pequeños, lo que resulta en un movimiento más suave y una mayor resolución de posición. Esto proporciona una mayor precisión y un menor ruido durante el funcionamiento del motor. En la Figura 40 se presenta el driver seleccionado, más detalles de este driver se encuentran en [7].

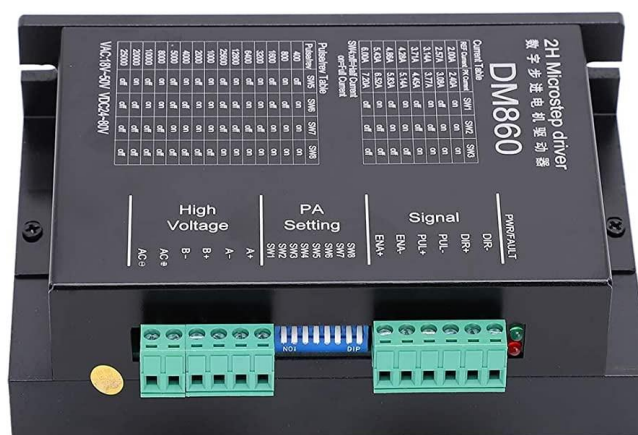


Figura 40. Driver DM860 para control de motores de precisión a pasos

9.5. Sensor ultrasónico HC-SR04

El sensor ultrasónico es un dispositivo utilizado para medir la distancia entre el sensor y un objeto cercano utilizando tecnología de detección infrarroja. También conocido como sensor de distancia de infrarrojos Sharp, se basa en el principio de tiempo de vuelo (time-of-flight) para determinar la distancia. El sensor de distancia infrarrojo Sharp emite pulsos de luz infrarroja y mide el tiempo que tarda en recibir el reflejo de la luz después de que rebote en un objeto. Utiliza un emisor de infrarrojos y un receptor para capturar la luz reflejada. La duración del tiempo de vuelo se convierte en una medida de la distancia entre el sensor y el objeto. Estos sensores son compactos y fáciles de usar, lo que los hace populares en aplicaciones de detección de proximidad y navegación de robots, así como en sistemas de seguridad y automatización., Se puede apreciar este dispositivo en la Figura 41 y tiene como características las que se muestran en la Tabla 11.



Figura 41. Sensor ultrasónico HC-SR04

Tabla 11. Características técnicas del sensor ultrasonico HC-SR04

| Descripción | Características |
|-------------------------|---|
| Distancia de medición | 2cm a 450cm |
| Salida | Voltaje Analógico (1V-3.3V) |
| Voltaje de alimentación | 4.5V-5.5V DC |
| Consumo de corriente | 15mA |
| Conexión | Conector JST PH de 3 pines (Cable con conector incluido) |
| Dimensiones | 29.5*13*13.5 mm |

9.6. Cámara web Genius 1000X

La cámara web Genius 1000X de 2MP es un dispositivo HD de 720P que ofrece una resolución de hasta 1000X, lo que significa que es capaz de capturar imágenes con gran detalle y nitidez. La cámara está equipada con un sensor de imagen de alta calidad y una lente de enfoque automático, lo que permite obtener imágenes claras y de alta resolución. Es la encargada de capturar la imagen de la planta a examinar. En la Figura 42 se presenta el dispositivo en mención.



Figura 42. Cámara web Genius 1000X

9.7. Driver de motor DC BTS7960 (HW-039)

El BTS7960 es un controlador de motor de doble puente H, diseñado para controlar la velocidad y dirección de un motor de corriente continua (DC) en ambas direcciones. Este controlador tiene una alimentación de 5.5 a 27V, corriente en reposo de 7 uA a 25 ° C, capacidad de PWM de hasta 25 kHz combinada con activación libre, protección de sobrecorriente, bloqueo de sobretensión, intensidad máxima de 43 Amperios, circuito digital de control con entradas de nivel logico y velocidad de giro ajustable por PWM de hasta 25 KHz. Vease la Figura 43.

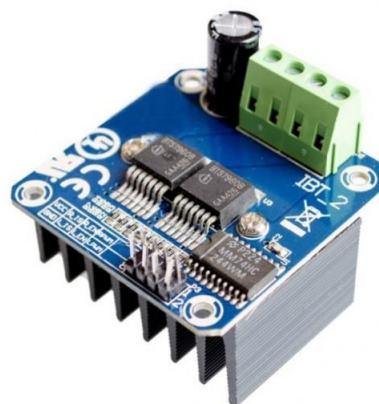


Figura 43. Driver de motor DC BTS7960 (HW-039)

9.8. Consumo eléctrico de componentes activos y pasivos

A continuación, en la Tabla 12 se puede apreciar el consumo eléctrico correspondiente de los equipos activos del sistema prototipo. Mientras que, en la Tabla 13, se observan los valores de consumo de los elementos pasivos. Nótese que ciertos elementos mostrados poseen un consumo casi despreciable, esto debido a que no se enfrentan a una carga de trabajo.

Tabla 12. Consumo Eléctrico de Elementos Activos

| Elemento Activo | Cantidad | Voltaje | Corriente | Consumo |
|-----------------|----------|---------|-----------|---------|
| Motor NEMA 23 | 4 | 5V | 2A | 40W |
| Motor DC 12V | 2 | 12V | 3A | 72W |

Tabla 13. Consumo Eléctrico de Elementos Pasivos

| Elemento Pasivo | Cantidad | Voltaje | Corriente | Consumo |
|------------------------------|----------|---------|-----------|---------|
| Driver BTS7960 para Motor DC | 2 | 5.5V | 7uA | 77 uW |
| Sensor Ultrasónico HC-SR04 | 1 | 5V | 15mA | 75 mW |
| Pantalla Display LCD 16x2 | 1 | 5V | 25mA | 12,5 mW |
| Módulo Procesador IoT ESP32 | 1 | 3.3V | 5uA | 1,65 uW |

En base al consumo conjunto de los elementos antes mencionados se emplea una fuente de alimentación de 24V y 20A para el suministro de energía de todo el sistema prototipo. Véase la Figura 44.



Figura 44. Fuente de Alimentación de 24V a 20 Amp

10. Diseño Informático: Redes Neuronales y Machine Learning

El apartado informático y del entorno de programación de este proyecto de investigación obedece al proceso ordenado mostrado en la Figura 45.

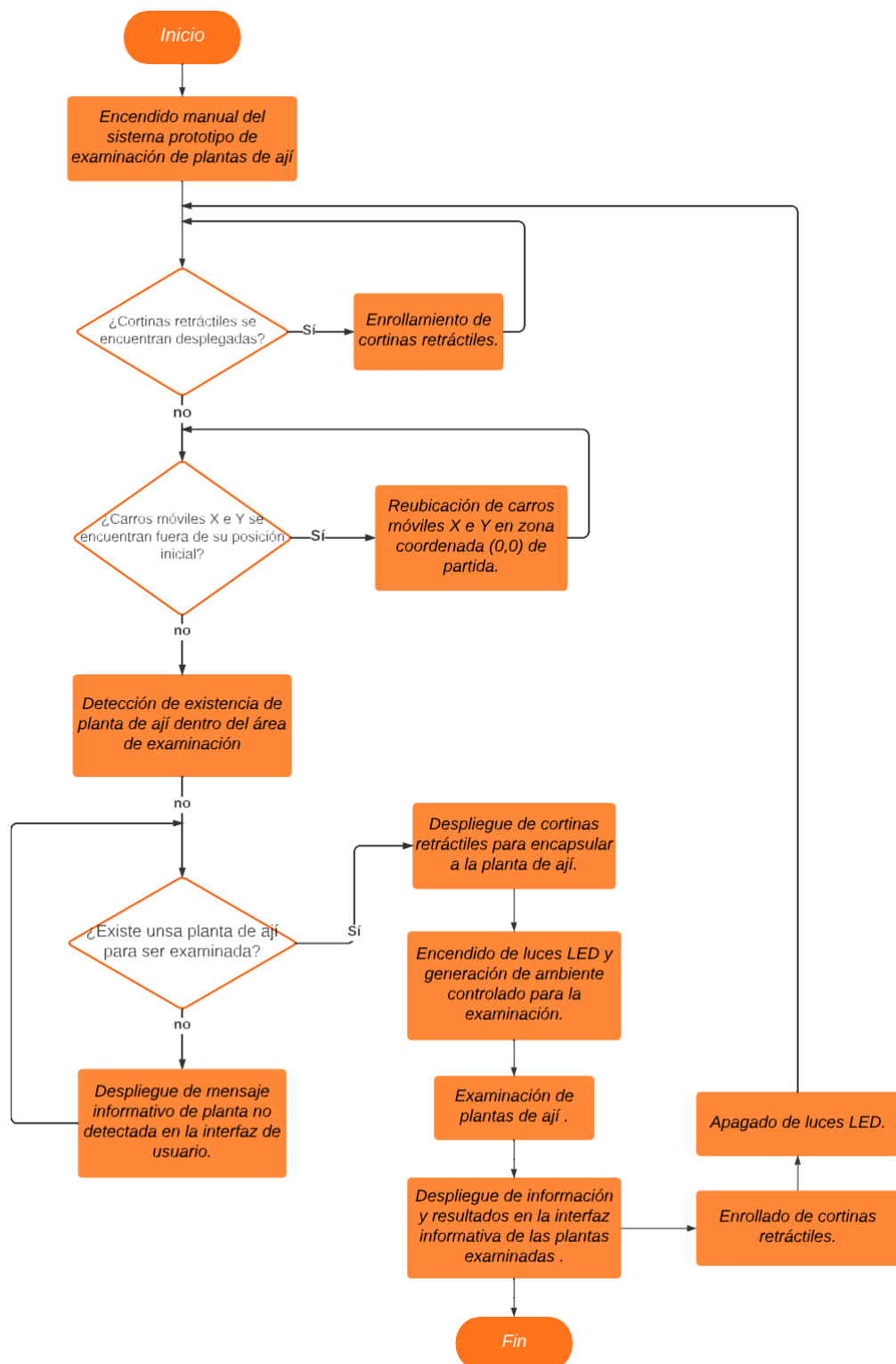


Figura 45. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema prototipo de examinación de plantas de ají *Capsicum Annuum*

10.1. Redes Neuronales Artificiales

Una red neuronal artificial (RNA) es un modelo matemático y computacional inspirado en la estructura y funcionamiento del sistema nervioso biológico, específicamente en el cerebro humano. Consiste en un conjunto interconectado de nodos (neuronas artificiales) que están organizados en capas y que trabajan en conjunto para procesar y analizar información.

Cada neurona artificial en una red neuronal artificial recibe entradas, realiza operaciones matemáticas en esas entradas y produce una salida. Estas operaciones matemáticas están influenciadas por los parámetros de la neurona, como los pesos y sesgos. Los pesos determinan la importancia de cada entrada en la salida de la neurona, y los sesgos permiten ajustar la activación de la neurona. Véase su configuración en la Figura 46.

Las capas en una red neuronal artificial pueden dividirse en tres tipos principales:

- Capa de entrada (input layer): Recibe los datos de entrada y transmite esta información a las capas ocultas.
- Capas ocultas (hidden layers): Realizan operaciones complejas mediante el procesamiento de datos de entrada a través de múltiples neuronas interconectadas.
- Capa de salida (output layer): Produce la salida final de la red neuronal basada en el procesamiento realizado por las capas ocultas.

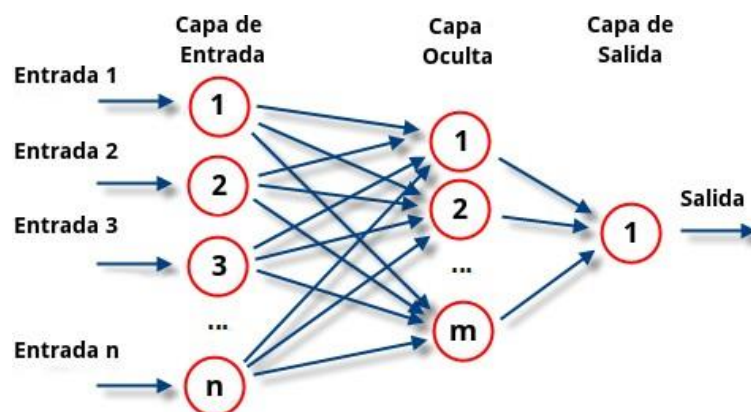


Figura 46. Estructura de una Red Neuronal Artificial dentro del entorno de Machine Learning

10.2. Entrenamiento de una Red Neuronal Artificial

Entrenar una red neuronal implica varios pasos clave para garantizar un entrenamiento efectivo y obtener un modelo que se ajuste a los datos de un problema específicos. A continuación, en la Figura 47, véase el procedimiento ordenado que contempla el entrenamiento de una red neuronal artificial:

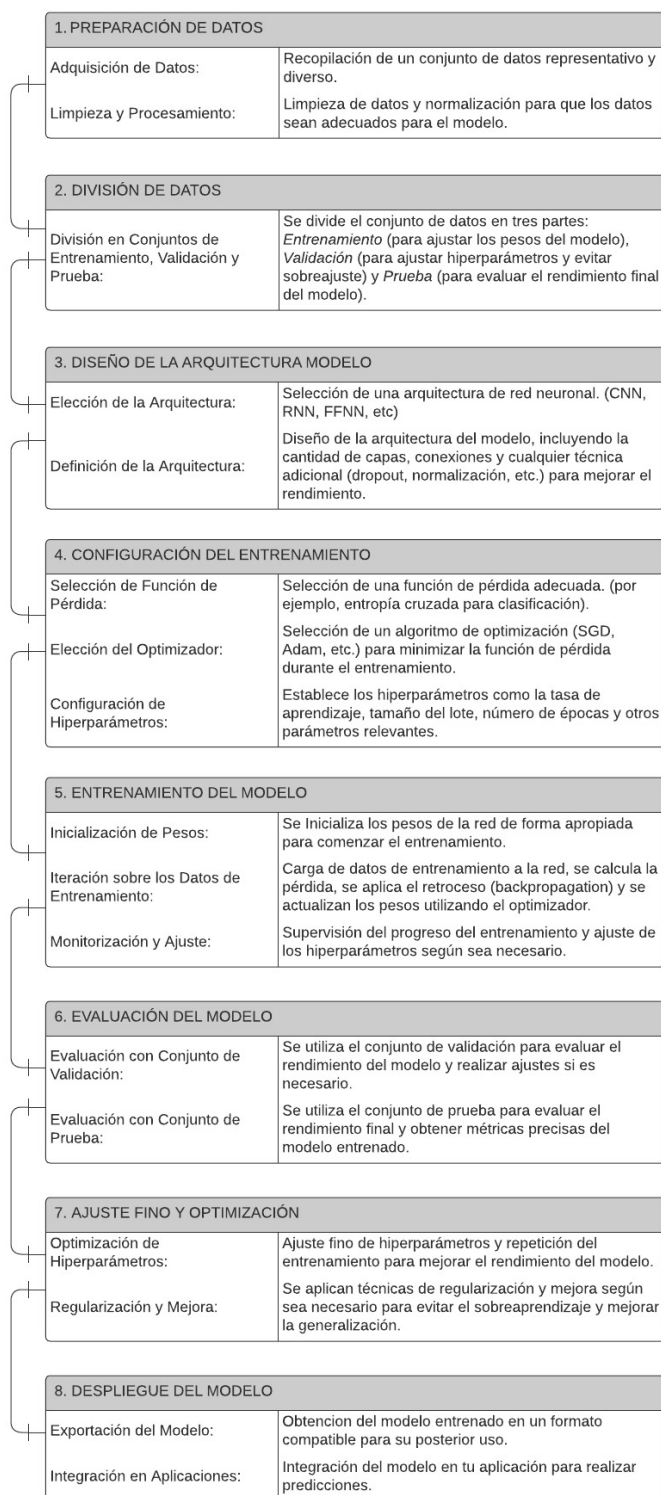


Figura 47. Etapas del entrenamiento de una Red Neuronal Artificial.

10.3. Generación de Bases de Datos

Una base de datos es fundamental para entrenar una red neuronal artificial porque proporciona los datos necesarios para que la red pueda aprender patrones y relaciones complejas. La calidad y cantidad de los datos en la base de datos de entrenamiento influyen directamente en el rendimiento y la precisión de la red neuronal, es por eso que, mientras más diverso y más específico sea el material del dataset, mucho mejores serán los niveles de aprendizaje del modelo entrenado. La base de datos de este proyecto de investigación debe contener:

- Variedad de Contenido: Amplio conjunto de imágenes de ajíes rojos y verdes.
- Contenido en balance: Proporciones adecuadas de imágenes de ajíes rojos y verdes para el entrenamiento.
- Representatividad: La base de datos debe representar de manera precisa y completa el dominio de aplicación de la red neuronal.
- Datos limpios y preprocesados: La base de datos debe estar limpia y bien preprocesada para eliminar datos atípicos (outliers), valores perdidos o ruidosos que puedan afectar negativamente al entrenamiento de la red neuronal.

La Base de datos empleada se conforma de un dataset experimental constituido por 20 fotografías obtenidas de 3 plantas de ají *Capsicum* (mírese la Figura 48) y 2 datasets preexistentes en la plataforma de procesamiento de imágenes de inteligencia artificial - "oboflow". El dataset conjunto suma un total de 1417 imágenes y se plantean 2 clases de elementos: ajíes rojos y ajíes verdes.



Figura 48. Fotografía de la plana modelo utilizada para la toma de imágenes experimentales para la construcción de la base de datos del modelo a entrenar.

10.4. Procesamiento virtual de imágenes en Roboflow

Dentro de la página OpenSource de Roboflow se encuentran una gran variedad de ejemplos de bases de datos de múltiples objetos, así como de plantas de ají con frutos ya identificados y etiquetados mediante *bounding boxes*. Se elige esta herramienta de IA precisamente por esta facilidad que dispone, ya que, representa una labor no tan ardua de cumplir evitando etiquetar, una a una, todas las imágenes del dataset elegido. Únicamente, se etiquetaron y encerraron mediante *bounding boxes* los ajíes de las plantas experimentales, ya que el número de las imágenes obtenidas de estas es relativamente pequeño. Véase en las Figuras 49 y 50 esta última descripción dentro del página de Roboflow".

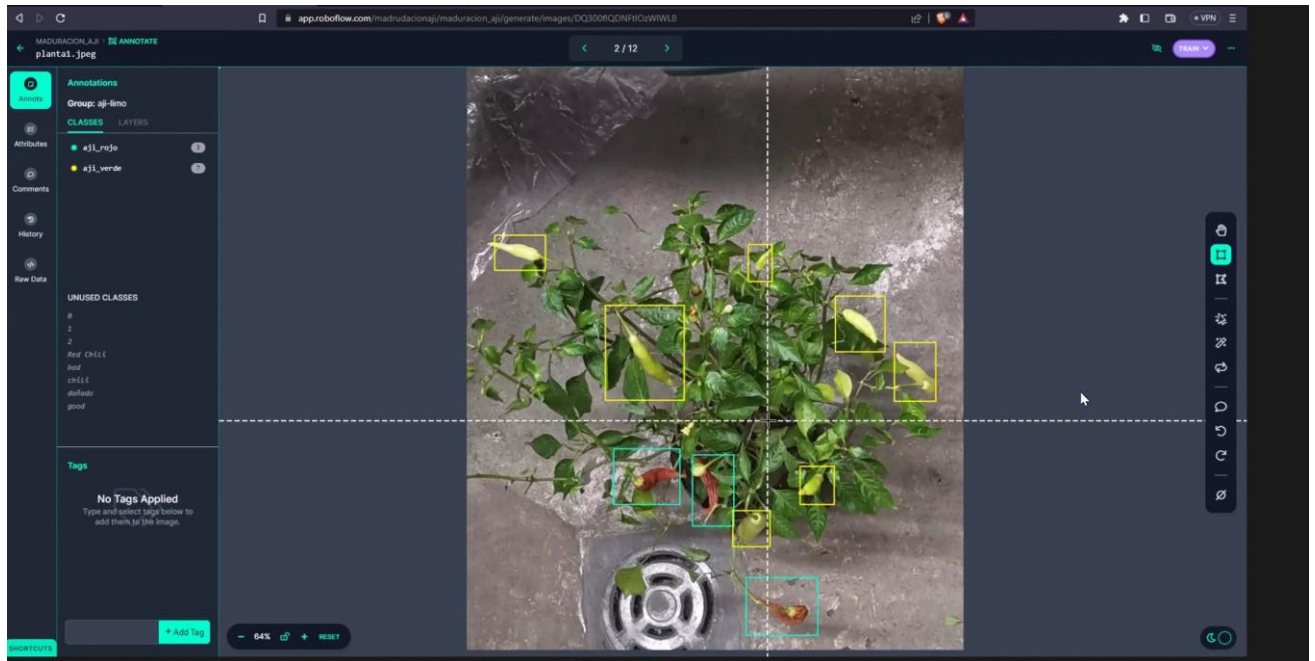


Figura 49. Captura de pantalla del etiquetado de ajíes de una fotografía de la planta modelo dentro de un sketch de la plataforma de Roboflow. Obsérvese los *bounding boxes* de los ajíes con colores verdes y turquesas.

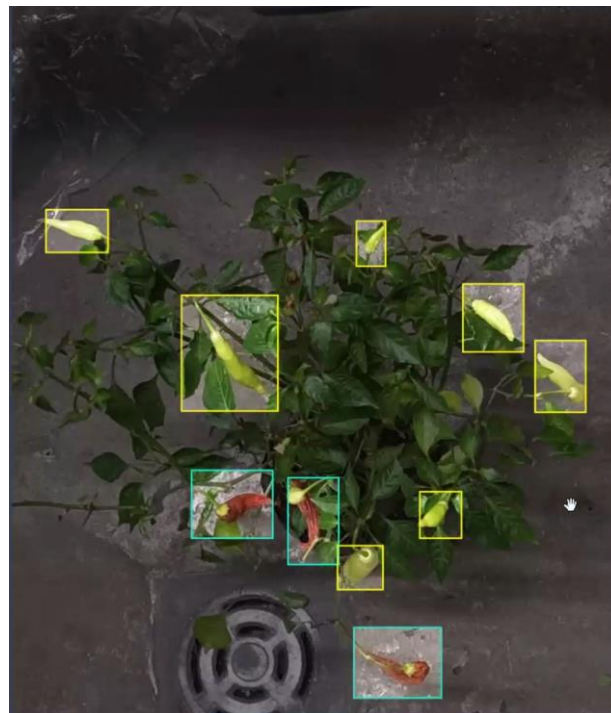


Figura 50. Captura de pantalla del etiquetado de ajíes de una fotografía de la planta modelo dentro de un sketch de la plataforma Roboflow. Obsérvese los *bounding boxes* de los ajíes con colores verdes y turquesas.

La ventaja de seguir este procedimiento con la plataforma Roboflow es que le permite al usuario hacer de manera dinámica y directa la generación de la base de datos para Yolo, en lugar de configurarlas y etiquetarlas, mediante programas secundarios, los ajíes en cada

una de las imágenes. Es importante mencionar también que, mientras más abundante y variado sea el contenido de la base de datos, más específicos serán los resultados obtenidos de predicción durante el entrenamiento de la red neuronal.

En este punto, se definen los conjuntos de datos necesarios para el entrenamiento de la red:

- Datos de Entrenamiento: 1086 imágenes.
- Datos de Validación: 231 imágenes.
- Datos de Prueba: 102 imágenes.

En las figuras 51 y 52 se muestran dos imágenes pertenecientes a las bases de datos del entorno Roboflow.



Figura 51. Imagen perteneciente a la base de datos pre-existente en la plataforma *Roboflow*, en la cual se puede distinguir el correcto etiquetado en *bounding boxes* del producto en cuerpo completo sin la exclusión de ninguno de ellos



Figura 52. Imagen perteneciente a la base de datos pre-existente en la plataforma *Roboflow*, en la cual se puede distinguir el correcto etiquetado en *bounding boxes* del producto en cuerpo completo sin la exclusión de ninguno de ellos

Mediante la elaboración de un cuadernillo en el entorno computacional Jupyter Notebook para el entrenamiento de la red neuronal con Python, se descarga el archivo Git del repositorio del YoloV5 y se enlaza, mediante programación, el cuaderno .ipynb al Google Drive, ya que, al manejarse una base de datos con 1084 imágenes se emplea un entorno de almacenamiento en la nube capaz de abarcar una considerable cantidad de archivos sin tener problemas de memoria. Para esto, se añade el directorio donde se encuentran las imágenes de la base de datos en el formato de YoloV5, generando así un archivo path con toda la información base. Se instalan todos los requerimientos del archivo Git de YoloV5 necesarios para enlazarlos con Python (esto puede variar de acuerdo al CPU o GPU con el que se esté realizando la programación). Es necesario instalar todos los requerimientos solicitados por el archivo Git en el equipo que va a actuar como computador de control, en este caso se utilizó una GPU NVIDIA A100-SXM4-40GB.

10.5. Entrenamiento de la red neuronal: YoloV5 (You Only Look Once version 5)

Es una arquitectura de red neuronal convolucional utilizada para la detección y localización de objetos en imágenes y videos en tiempo real. YOLOv5 es una evolución de las versiones anteriores de YOLO (You Only Look Once), que se caracteriza por su eficiencia y precisión en la detección de objetos en escenas complejas.

La principal característica de YOLOv5 es su enfoque en el equilibrio entre rendimiento y precisión. La arquitectura utiliza una serie de capas convolucionales profundas para extraer características de la imagen y luego predecir las coordenadas de los cuadros delimitadores *bounding boxes* que rodean los objetos de interés, junto con las etiquetas de las clases a las que pertenecen. YOLOv5 mejora la velocidad y la exactitud de la detección al introducir capas de atención espacial y otros ajustes en la arquitectura.

Esta red neuronal es ampliamente utilizada en aplicaciones de visión por computadora, como la detección de objetos en tiempo real en sistemas de seguridad, vehículos autónomos, monitoreo de tráfico y análisis de imágenes médicas, entre otros. Su capacidad para lograr una detección rápida y precisa la hace valiosa para una variedad de casos de uso donde la velocidad y la precisión son cruciales.

10.6. YoloV5s ((You Only Look Once version 5 Small)

Es una variante de la arquitectura YOLOv5 que se centra en mantener un equilibrio entre la eficiencia y la precisión en la detección de objetos en imágenes y videos. Esta versión "S" se caracteriza por tener una arquitectura más liviana en comparación con las variantes más grandes de YOLOv5, lo que permite una ejecución más rápida en dispositivos con recursos limitados.

Al igual que otras versiones de YOLOv5, YOLOv5-S sigue el enfoque de "detección en una sola mirada" (You Only Look Once), lo que significa que predice cuadros delimitadores *bounding boxes* y etiquetas de clases directamente desde una imagen completa en lugar de dividirla en regiones más pequeñas. Esta metodología acelera la detección de objetos y la hace adecuada para aplicaciones en tiempo real. YOLOv5-S es una elección popular para casos de uso en los que se requiere detección rápida y eficiente en dispositivos con recursos limitados, como cámaras de vigilancia, sistemas de seguridad, drones y otros dispositivos embebidos.

Es importante señalar que YOLOv5-S es una variante específica de la familia YOLOv5 y se encuentra en el rango de modelos más ligeros y rápidos, con una menor cantidad de parámetros en comparación con las versiones más grandes como YOLOv5-M, YOLOv5-L y YOLOv5-X, que ofrecen mayor precisión pero pueden requerir más recursos computacionales.

10.7. Configuración y Preparación de la Red Neuronal

Para poder configurar el modelo, es necesario definir su arquitectura de manera ordenada, para lo cual, en la Figura 53 se muestra el procedimiento ordenado de configuración con YoloV5.

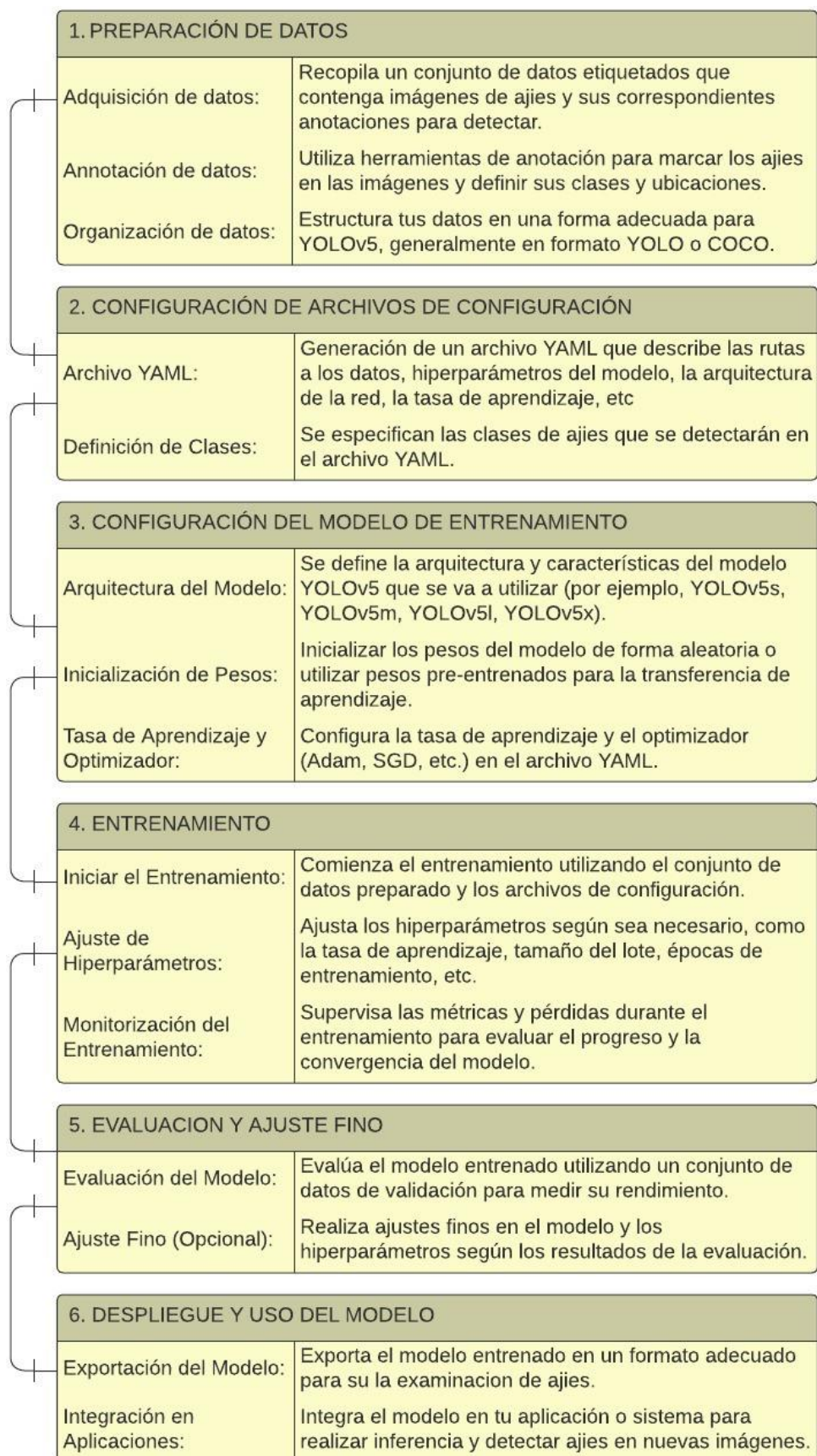


Figura 53. Diagrama de bloques explicativo para la conformación y configuración del entrenamiento de una red neuronal con la arquitectura de YoloV5s.

Para poder comenzar con el entrenamiento se requieren de los siguientes elementos:

- Los pesos de la red neuronal pre-entrenada existentes de YoloV5.
- El archivo *.yaml* de los pesos de la red neuronal pre-entrenada generado en Roboflow
- Un archivo *workers* para determinar los subprocessos para cargar y procesar las imágenes de manera eficiente y acelerar el proceso.

Específicamente, dentro del entorno informático son identificados como:

- – *weights yolov5s.pt*
- – *cfg yolov5s.yaml*
- – *hyp.scratch.yaml*
- – *workers*

La configuración de los hiperparámetros típicos utilizados para poder generar los entrenamientos de predicción se pueden observar en la Tabla 14.

Tabla 14. Hiperparámetros típicos utilizados para poder generar los entrenamientos de predicción del modelo generado en YoloV5s

| Descripción | Valor | Definición |
|------------------------|--------|---|
| <i>lr0</i> | 0.01 | initial learning rate (SGD=1E-2, Adam=1E-3) |
| <i>lrf</i> | 0.2 | final OneCycleLR learning rate ($lr0 * lrf$) |
| <i>momentum</i> | 0.937 | SGD momentum/Adam beta1 |
| <i>weight decay</i> | 0.0005 | optimizer weight decay 5E-4 |
| <i>warmup epochs</i> | 3.0 | warmup epochs (fractions ok) |
| <i>warmup momentum</i> | 0.8 | warmup initial momentum |
| <i>warmup bias lr</i> | 0.1 | warmup initial bias lr |
| <i>box</i> | 0.05 | box loss gain |
| <i>cls</i> | 0.5 | cls loss gain |
| <i>cls pw</i> | 1.0 | cls BCELoss positive weight |
| <i>obj</i> | 1.0 | obj loss gain (scale with pixels) |
| <i>obj pw</i> | 1.0 | obj BCELoss positive weight |
| <i>iou t</i> | 0.20 | IoU training threshold |
| <i>anchor t</i> | 4.0 | anchor multiple threshold |
| <i>fl gamma</i> | 0.0 | focal loss gamma (efficientDet default gamma=1.5) |
| <i>hsv h</i> | 0.015 | image HSV-Hue augmentation (fraction) |
| <i>hsv s</i> | 0.7 | image HSV-Saturation augmentation (fraction) |
| <i>hsv v</i> | 0.4 | image HSV-Value augmentation (fraction) |
| <i>degrees</i> | 0.0 | image rotation (+/- deg) |
| <i>translate</i> | 0.1 | image translation (+/- fraction) |
| <i>scale</i> | 0.5 | image scale (+/- gain) |
| <i>shear</i> | 0.0 | image shear (+/- deg) |
| <i>perspective</i> | 0.0 | image perspective (+/- fraction), range 0-0.001 |
| <i>flipud</i> | 0.0 | image flip-up-down (probability) |
| <i>fliplr</i> | 0.5 | image left-right (probability) |
| <i>mosaic</i> | 1.0 | image mosaic (probability) |
| <i>mixup</i> | 0.0 | image mixup (probability) |
| <i>copy taste</i> | 0.1 | segment copy-taste (probability) |

Cada uno de estos factores se pueden ir variando con el fin de encontrar el mejor modelo posible, a manera de prueba error, se resume en una estrategia heurística, que recae en la toma de decisiones aproximadas o simplificadas que puedan acelerar o mejorar el rendimiento del modelo de detección de objetos.

Se trabaja a un ritmo de entrenamiento de 200 épocas mostrando, uno a uno, los pa-

rámetros de minimización para realizar la generalización final de la última capa. Véase, en la Tabla 15, los parámetros de evaluación de la época 0/199 del entrenamiento de la red, y en la Tabla 16, los parámetros de evaluación de la época 196/199. Es necesario recordar que un época es cada iteración en la que se realiza un ciclo de corrección de propagación hacia atrás y hacia adelante con el objetivo de disminuir la pérdida de información. En pocas palabras, la propagación hacia atrás implica encontrar las ponderaciones y sesgos óptimos de entrada para lograr un resultado más preciso o "minimizar la pérdida".

Tabla 15. Tabla matriz de datos correspondiente a la época 0/199 del entrenamiento de la red neuronal. Obsérvese los valores de los parámetros de regresión de cada iteración.

| EPOCH | GPU MEM | BOX LOSS | OBJ LOSS | CLS LOSS | INSTAN | SIZE |
|-------|---------|----------|----------|----------|--------|--------------------|
| 0/199 | 13,7G | 0,1098 | 0,06668 | 0,03848 | 604 | 640:100 % 18/18 |
| | Class | Images | Instance | P | R | mAP50 |
| | all | 231 | 1592 | 0.0469 | 0.0585 | 0.0165 |

Tabla 16. Tabla matriz de datos correspondiente a la época 196/199 del entrenamiento de la red neuronal. Obsérvese los valores de los parámetros de regresión de cada iteración.

| EPOCH | GPU MEM | BOX LOSS | OBJ LOSS | CLS LOSS | INSTAN | SIZE |
|---------|---------|----------|----------|----------|--------|--------------------|
| 196/199 | 16,9G | 0,02694 | 0,0365 | 0,00133 | 626 | 640:100 % 18/18 |
| | Class | Images | Instance | P | R | mAP50 |
| | all | 231 | 1592 | 0.725 | 0.629 | 0.645 |

Los parámetros de cada una de las épocas en las que se fue entrenando el modelo, observables en las Tablas 15 y 16, son:

- **mAP50:** Es un valor de maximización que permite medir el error de detección cuando se emplean *bounding boxes* en el reconocimiento de imágenes. Estos valores se optimizan en cada una de las épocas. Por ejemplo, en la Tabla 15 se observa que, durante la época 0/199 se tiene un valor de mAP50 de 0,0165, mientras que en la época 196/199 de la tabla 16 se tiene un valor de 0,645. Esto quiere decir que, mientras más próximo a 1 sea valor del mAP50, más parecido será el *bounding box* dibujado en la imagen de la base de datos al *bounding box* que predijo la red.
- **box loss:** Que corresponde al error de la regresión de los *bounding boxes*.

- *obj loss*: Que corresponde al error de clasificación de los *bounding boxes*.
- *cls loss*: Que corresponde a la función de pérdida de clasificación, utilizada para medir la discrepancia entre las etiquetas reales y las predicciones generadas por el modelo.
- *instances*: Predicciones que contienen información sobre los objetos detectados.

Una vez terminado el entrenamiento de la red, se obtiene la matriz de confusión que evalúa cómo el modelo clasifica los objetos en relación con las clases reales y sus respectivos errores, lo que permite evaluar su rendimiento y analizar las predicciones realizadas. Con los valores de elementos aquí predichos, de manera correcta y de manera errónea, se puede analizar el rendimiento del modelo en la predicción de las clases de los ajíes rojos y verdes, y cual de estos es logrado de mejor manera. Véase la matriz de confusión en la Figura 54 junto a los errores cometidos durante su labor. Y, a su vez, con estos valores se generan las métricas de la matriz de confusión de evaluación de desempeño de YoloV5. Se pueden encontrar las métricas generadas en el programa de la Tabla III junto a su respectiva evaluación.

Usando estos valores, se pueden calcular las métricas asociadas a los valores entre las clases predichas y las actuales, mediante las expresiones matemáticas de la Figura 55. Trabajando esta técnica de clasificación entrenada para cada una de las clases de ajíes se tienen las medidas de predicción de exactitud siguientes:

| | | Predicted class | | | |
|--------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------|---|
| | | True Positives (TP) | False Negatives (FN) | Measure | formula |
| Actual class | True Positives (TP) | | | Accuracy | $(TP+TN)/(TP+FP+FN+TN)$ |
| | False Positives (FP) | | | Precision | $TP / (TP+FP)$ |
| | False Positives (FP) | | | Recall | $TP / (TP+FN)$ |
| | True Negatives (TN) | | | F-Measure | $2*Precision*Recall / (Precision+Recall)$ |

Figura 55. Expresiones matemáticas para el cálculo de las magnitudes de entrenamiento del modelo de predicción de ajíes generado en función de los verdaderos positivos, verdaderos negativos, falsos positivos y falsos negativos, de todas las clases

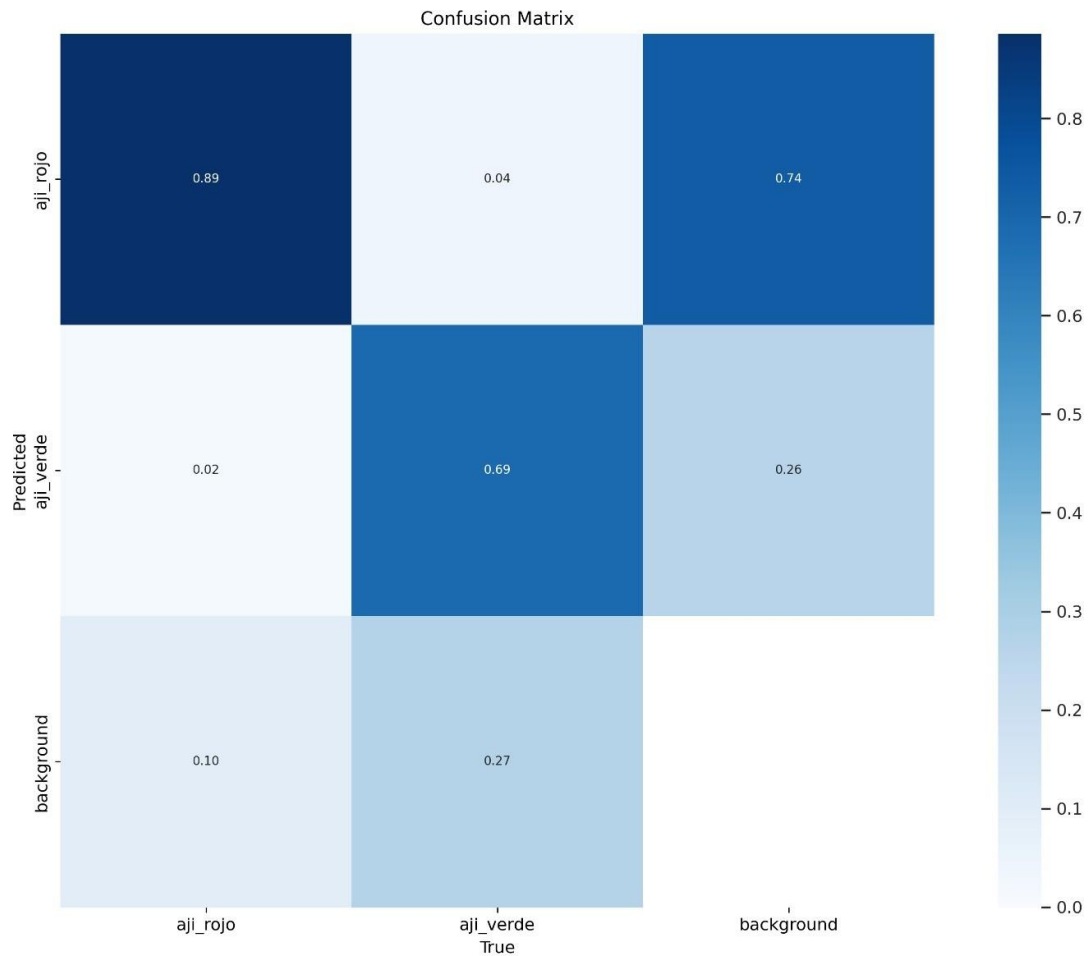


Figura 54. Matriz de confusión generada del modelo entrenado en YoloV5 con los errores cometidos por el modelo de detección de ajíes al realizar predicciones sobre los datos de prueba

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + FP + FN + TN)} \quad (7)$$

Donde:

TP Valores verdaderos positivos

TN Valores verdaderos negativos

FP Valores falsos positivos.

FN Valores falsos negativos.

Clase Ajíes Rojos:

$$Accuracy_r = \frac{(0,88+1,2)}{(0,88+0,02+0,03+1,2)}$$

$$Accuracy_r = 0,976$$

Clase Ajíes Verdes:

$$Accuracy_v = \frac{(0,49+1,55)}{(0,49+0,02+0,07+1,55)}$$

$$Accuracy_v = 0,957$$

Se continua después con la técnica de precisión de detección de clases.

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (8)$$

Clase Ajíes Rojos:

$$Precision = \frac{0,88}{(0,88+0,02)}$$

$$Precision = 0,977$$

Clase Ajíes Verdes:

$$Precision = \frac{0,49}{(0,49+0,02)}$$

$$Precision = 0,976$$

Habiéndose completado un totalidad de 200 épocas entrenadas con el modelo desarrollado en YoloV5, se obtienen, en el entorno de Google Colab, las matriz de confusión del entrenamiento del modelo empleado. Véase la Figura 56.

Tras cumplirse la etapa de entrenamiento del modelo de la red neuronal, se puede apreciar la detección de ajíes de la planta modelo experimental en la Figura 57, la detección de ajíes rojos en la Figura 58 y la detección de los ajíes verdes en la Figura 59.

```

200 epochs completed in 0.532 hours.
Optimizer stripped from runs/train/maduracion_aji_det/weights/last.pt, 14.5MB
Optimizer stripped from runs/train/maduracion_aji_det/weights/best.pt, 14.5MB

Validating runs/train/maduracion_aji_det/weights/best.pt..
Fusing layers...
YOLOv5s summary: 157 layers, 7018216 parameters, 0 gradients, 15.8 GFLOPs

```

| Class | Images | Instances | P | R | mAP50 | mAP50-95: 100% 2/2 [00:05<00:00, 2.85s/it] |
|-----------|--------|-----------|-------|-------|-------|--|
| all | 231 | 1592 | 0.757 | 0.642 | 0.661 | 0.399 |
| aji_rojo | 231 | 1011 | 0.887 | 0.857 | 0.904 | 0.62 |
| aji_verde | 231 | 489 | 0.629 | 0.429 | 0.424 | 0.223 |

Figura 56. Captura de pantalla de la matriz de confusión resultado generada en el cuadernillo de Jupyter Notebook tras entrenar y validar, durante 200 iteraciones programadas, el modelo de YoloV5.

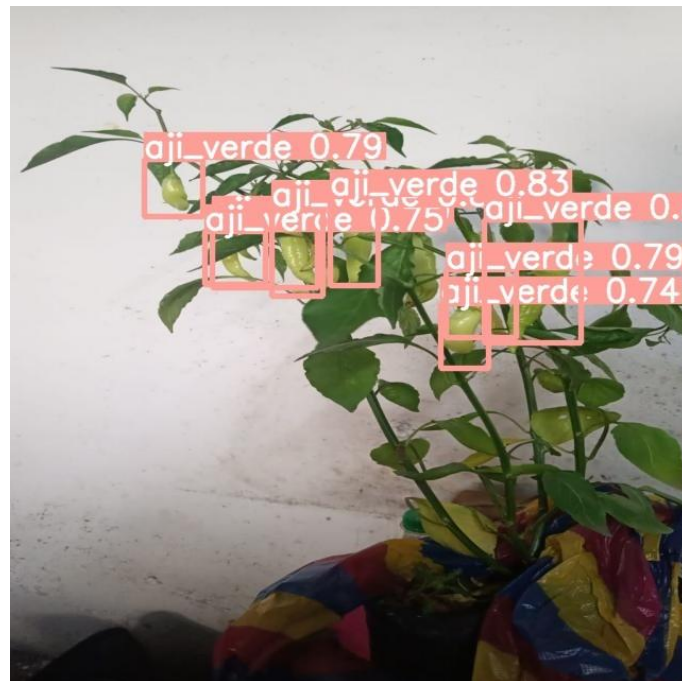


Figura 57. Precisión de la predicción obtenida de los ajíes en la planta sujeto de prueba (que se muestran como aji_verde o aji_rojo).



Figura 58. Precisión de la predicción obtenida de los ajíes rojos (que se muestran como aji_rojo).



Figura 59. Precisión de la predicción obtenida de los ajíes verdes (que se muestran como aji_verde).

En la figuras 60, 61, 62, 63, 64 y 65 se pueden apreciar, gráficamente, los comportamientos de las métricas utilizadas para la supervisión y análisis del rendimiento del modelo a lo largo de 200 iteraciones completadas durante el proceso de entrenamiento.

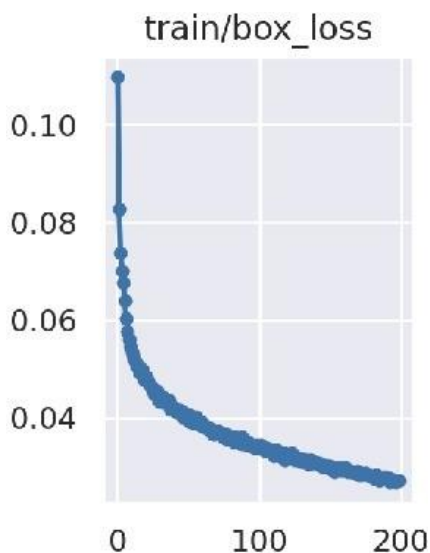


Figura 60. Gráfica de optimización de los valores de los *boundingboxes*. Esta gráfica muestra la reducción del error de la predicción de *boundingboxes* durante el entrenamiento

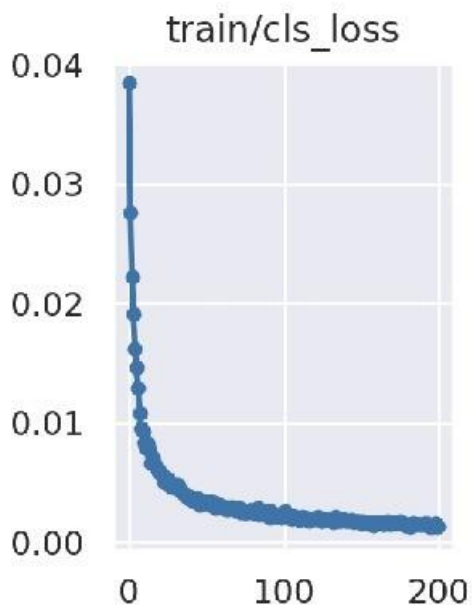


Figura 61. La gráfica de optimización de la predicción de las clases. Esta gráfica muestra la reducción del error de la predicción de las clases durante el entrenamiento

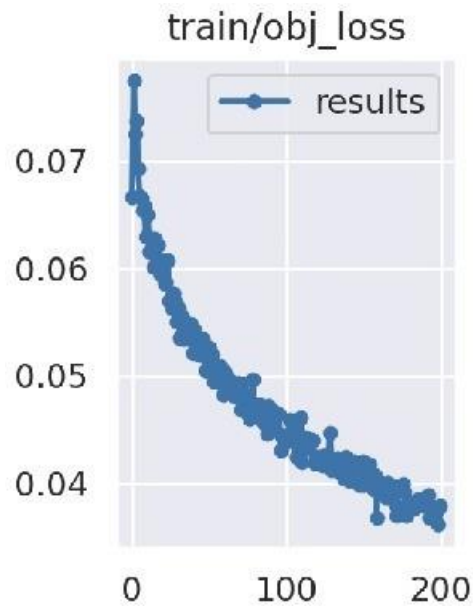


Figura 62. La gráfica de optimización de los valores de "objectness", la cual refleja la probabilidad de que una caja(box) contenga un objeto. Esta gráfica muestra la reducción del error en la medida

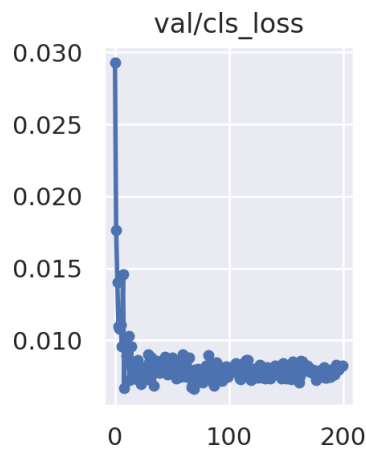


Figura 63. Gráfica de pérdida de clasificación en validación. Esta gráfica muestra la pérdida relacionada con la clasificación de ajíes en las clases durante la fase de validación. La pérdida de clasificación en validación se utiliza para evaluar la capacidad del modelo de asignar la clase correcta a cada ají detectado en los datos de validación. Una disminución en la pérdida de clasificación indica que el modelo está mejorando su capacidad para reconocer y clasificar los ajíes en las categorías correctas en los datos de validación

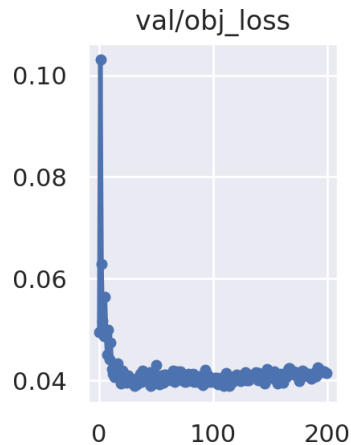


Figura 64. Gráfica de pérdida de objetos en validación. Esta gráfica representa la pérdida asociada a la detección y clasificación de objetos durante la fase de validación. Mide la discrepancia entre las detecciones realizadas por el modelo y las anotaciones de objetos reales en los datos de validación. Una disminución en la pérdida de objetos indica una mejora en la capacidad del modelo para detectar y clasificar los ajíes correctamente en los datos de validación

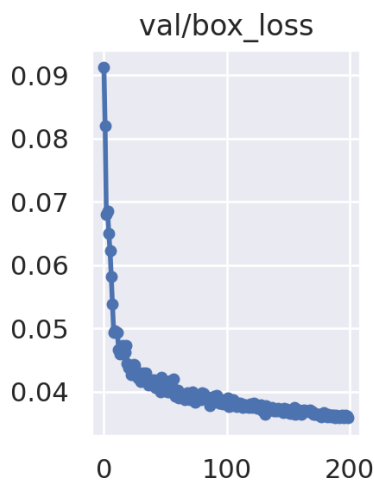


Figura 65. Gráfica de pérdida de *boundingboxes* en validación. Esta gráfica muestra la evolución de la pérdida asociada a la precisión de la localización de *boundingboxes* alrededor de los ajíes durante la fase de validación. Cuanto menor sea la pérdida de cajas, mejor será la capacidad del modelo para ajustarlas y ubicarlas alrededor de los ajíes con precisión en los datos de validación

11. Conclusiones

El modelo logra identificar de manera precisa los ajíes rojos y verdes en situaciones naturales, donde la visibilidad de los frutos podría ser limitada debido a la luz desfavorable u otras condiciones. Esto se logra sin necesidad de manipular la planta para realizar la clasificación. Aunque la presencia de ruido en las imágenes del dataset empleado (como exceso de hojas, ramas y/o modificaciones en las imágenes de RoboFlow) presenta un desafío adicional para el modelo, los resultados obtenidos muestran un reconocimiento sobresaliente de los productos en mención.

El modelo de YOLOv5, entrenado con un database misceláneo de imágenes pre-existentes e imágenes obtenidas experimentalmente, logra un óptimo nivel de precisión (P) de un 75,7% para la detección de ambas clases, un aceptable nivel de precisión en la detección de los ajíes verdes con un 62,9% y un estupendo 88,7% de precisión para la detección de los ajíes rojos durante el entrenamiento. Así mismo, la matriz de confusión resultado expone que este modelo delimita los objetos detectados mediante bounding boxes (mAP50) con una exactitud del 66,1% para ambas clases, delimita los ajíes verdes con un tolerable 42,4% y para los ajies rojos con un sobresaliente 90,4%. (Información verificable en las Figuras 50 y 52).

Esta afirmación se traduce en que el modelo desarrollado obtiene mejores resultados analizando ajíes de color rojo que con los ajíes verdes. Con el fin de mejorar el desempeño del modelo logrado se propone reforzar el database utilizado ingresando imágenes más estrictas y específicas de las plantas de las cuales se quiere obtener un análisis, para así poder elevar el resultado porcentual eficiente de la matriz de confusión. A pesar de que la viabilidad lumínica de la zona de detección del sistema prototipo no es la idónea, esta tasa de precisión es un logro significativo que demuestra el potencial de los modelos de aprendizaje profundo en el ámbito agrícola que pretendan ser proyectados a escala real.

12. Recomendaciones

- Previo a la puesta en marcha de la máquina es imperante verificar que los personas de anclaje de los carros móviles X e Y se encuentren debidamente sujetos a los tornillos,

respectivamente. Prestar desatención a este punto puede ocasionar desproporciones de fuerzas en los motores a pasos generando daños en sus ejes.

- Antes de encender el sistema prototipo verificar que la caja de control no se encuentre mojada o con rastros de humedad dentro de ella. Esto preveerá que se den cortocircuitos dentro del sistema eléctrico y electrónico.
- Mantener la caja de control siempre cerrada. No se debe admitir su manipulación por individuos que carezcan de conocimiento técnicos en el tema.
- En el caso de que el display LCD presentase algún error en pantalla, verificar su arreglo oprimiendo el botón Reset.^{en} el mismo. Si el error persiste consulte con su tecnico de confianza.
- Cada 30 días el operario debe revisar que las cadenas portacables se encuentren sujetas a la bancada y con los cables debidamente organizados en su interior. Un cable suelto podría incurrir en desconexiones y paros de funcionamiento de la máquina.
- Se recomienda mantener libre, limpio y despejado el área de examinación de las plantas durante el uso del prototipo. Cualquier tipo de intervención no autorizada podría incurrir en accidentes o averías.
- Con el fin de prolongar la vida útil de los rodamientos lineales se recomienda engrasar los ejes de apoyo de los carros X e Y cada 90 días (aumentar o disminuir las ocasiones dependiendo del uso de la máquina). Esto, a su vez, permitirá un mejor deslizamiento lineal de los mismos, reduciendo esfuerzos extras a los motores.
- Es de suma importancia que el operario que se encuentre frente al sistema prototipo prevea que la integridad de la planta de ají no se vea afectada ni sufra daño alguno, ya que el control de calidad durante su cosecha debe permanecer íntegra.
- En el caso de que el lente de la cámara web se encuentre empañado o sucio, se recomienda utilizar una franela suave para limpiar la superficie del lente ejerciendo una fuerza moderada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Flecha, "Procesos y técnicas de panificación," *Sin editorial*, 2015.
- [2] J. Figueroa y M. José, "Diseño y construcción de una laminadora y diseño de una línea de producción para panificación," Ph.D. dissertation, Esc. Ing. Mecánica, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba, Ecuador, 2010.
- [3] Trima, *Divisora Boleadora Automática K2*, Trima Bakery Machines, Alemania.
- [4] C. R. Romeva, *Diseño concurrente*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2010, vol. 126.
- [5] R. L. Mott, R. Navarro Salas *et al.*, *Resistencia de materiales aplicada*, 1996.
- [6] Siemens, *IEC Squirrel-Cage Motors*, Siemens AG, Germany, Enero 2008.
- [7] Manual de usuario dm860. [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/2SCAD8h> [Fecha de consulta: Julio 2019]

Anexo A: Desarrollo de la QFD

1.1. VOZ DEL USUARIO

La voz del usuario describe los requerimientos que la solución de mejora del control de calidad de los ajies en el sector agroindustrial debe tener y, en un caso hipotético, de un inversionista agrícola que quiera hacerse con la adquisición de un sistema propuesto como el explicado en este documento. Los requerimientos se enlistan a continuación:

- Cantidad de ajies por planta.
- Identificación de ajies de acuerdo a su color(rojo, amarillo, verde).
- Conteo de ajies de acuerdo a su color(rojo, amarillo, verde).
- Identificación de ajies con maduración incompleta (tonalidades mixtas).
- Conteo de ajies con maduración incompleta (tonalidades mixtas).
- El proceso debe ser automático.
- El sistema prototipo debe obtener datos por medio de una cámara web.
- Despliegue de información en una interfaz amigable con el usuario.

1.2. ANÁLISIS DE LA COMPETENCIA

En el análisis de la competencia se evalúan y comparan 2 soluciones tecnológicas para el sector agroindustrial, un aspersor ambulante de riego en invernaderos y una aplicativo móvil para la inspección de cultivos mediante sobrevuelo de naves no tripuladas (drones). Este análisis abre la posibilidad de desarrollar un diseño óptimo para una máquina o una solución tecnológica que tenga una mayor competitividad en el mercado. Del análisis realizado se concluyó que, a fin de lograr el cometido propuesto, es imperante prestar mayor atención y énfasis a la implementación del tipo de cámara web, que la máquina sea mecánicamente modular, que posea una adecuada interfaz debidamente estructurada para informar al usuario el valor y estado de todas las variables que interviene en el sistema y que posea una adecuada área de examinación para las plantas de ají *Capsicum*. En la Figura 1 se

presenta la evaluación del sistema prototipo desarrollada en comparación con las otras 2 soluciones presentadas.

| Correlaciones | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|--|---------------------|--------------------------|---------------|--------|
| Positivo + | | | | | | | | | |
| Negativo - | | | | | | | | | |
| No Correlacion | | | | | | | | | |
| Relaciones | | | | | | | | | |
| Fuerte ● | | | | | | | | | |
| Moderado ○ | | | | | | | | | |
| Leve ▲ | | | | | | | | | |
| Direccion de mejor | | | | | | | | | |
| Se maximiza ▲ | | | | | | | | | |
| Objetivo ◇ | | | | | | | | | |
| Se minimiza ▼ | | | | | | | | | |
| # Fila | Tabla de pesos | Peso relativo % | Importancia del cliente | Relación máxima | Evaluación del usuario | Columna | | | # Fila |
| | | | | | | Dirección de mejora | Sistema prototipo propio | Competencia 1 | |
| | | | | | Especificaciones técnicas requeridas. | | | | |
| | | | | | Demandas del cliente | | | | |
| 1 | ■ | 11% | 8,5 | 9 | Conteo de ajies por color | 4 | 3 | 3 | 1 |
| 2 | ■ | 11% | 8,5 | 9 | Conteo de ajies inmaduros. | 4 | 3 | 2 | 2 |
| 3 | ■ | 11% | 8,5 | 9 | Conteo de ajies maduros. | 4 | 2 | 3 | 3 |
| 4 | ■ | 11% | 8,5 | 9 | Conteo de ajies con maduración temprana. | 4 | 1 | 3 | 4 |
| 5 | ■ | 11% | 8 | 9 | Despliegue de información en pantalla amigable | 5 | 3 | 3 | 5 |
| 6 | ■ | 8% | 6 | 9 | Tenga facilidad para ser escalable. | 3 | 2 | 4 | 6 |
| 7 | ■ | 4% | 3 | 9 | No tenga partes sensibles expuestas | 2 | 2 | 1 | 7 |
| 8 | ■ | 5% | 4 | 3 | Fácil de limpiar. | 3 | 4 | 3 | 8 |
| 9 | ■ | 9% | 6,5 | 9 | Seguro | 4 | 3 | 3 | 9 |
| 10 | ■ | 4% | 3 | 9 | No produzca ruido excesivo | 3 | 3 | 5 | 10 |
| 11 | ■ | 7% | 5 | 9 | Estructura sólida. | 4 | 2 | 4 | 11 |
| 12 | ■ | 9% | 6,5 | 3 | Fácil mantenimiento | 4 | 4 | 2 | 12 |

Figura 1. Análisis de competencia del sistema prototipo

1.3. VOZ DEL INGENIERO

El desarrollador del sistema prototipo es un profesional capacitado en la aplicación de conocimientos científicos y técnicos para diseñar, desarrollar, construir y mejorar sistemas en base a una serie de requerimientos básicos técnicos que tienen como origen la necesidad de otro individuo, sabiéndose que la demanda y juicio de cada parte es subjetiva.

- Diseñar un sistema prototipo examinador de plantas de ají cuyo tiempo de identificación y conteo de ajies no sea mayor a los 6 minutos por tarea.
- Implementar un tipo de cámara web de alta resolución.
- Diseñar un mecanismo de movimiento cartesiano cuyo tiempo de desplazamiento entre ejes sea menor a los 3 minutos.
- Diseñar un sistema mecánico modular que esté conformado de 3 partes.
- Diseñar una interfaz informativa que muestre en pantalla al operario un total de 10 variables del sistema.

1.4. CORRELACIONES

Se evalúa en qué medida las características técnicas elegidas en base a las preferencias del cliente pueden satisfacer sus demandas. Se utilizan tres niveles de satisfacción: alto, representado por el número 9; medio, representado por el número 3; y bajo, representado por el número 1. Si no existe ninguna relación entre las características técnicas y las demandas del cliente, no se asigna ningún valor. En la Figura 2 se muestran los valores asignados a cada una de las demandas presentadas por el usuario.

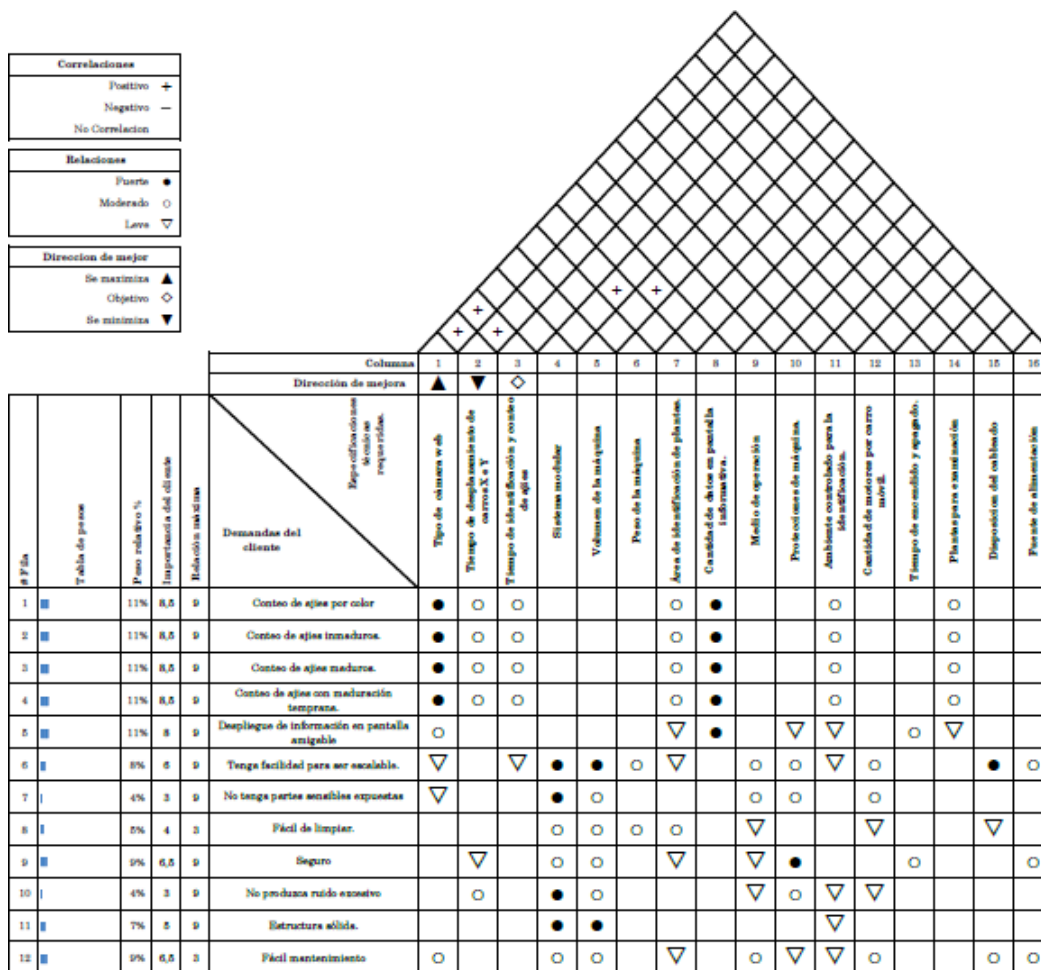


Figura 2. Correlaciones entre las demandas del usuario y características técnicas de la voz del ingeniero

1.5. EVALUACIÓN TÉCNICA

Esta evaluación sobresalta todas aquellas características técnicas que tienen mayor valor dentro del desarrollo del sistema prototipo. En la Figura 3 se puede observar todas las características técnicas desarrolladas frente a su respectivo porcentaje. En esta, se lee que el tipo de cámara web, el mecanismo modular del sistema prototipo, la interfaz informativa debidamente estructurada para información al usuario y la existencia de una adecuada área de examinación para las plantas de ají Capsicum van a ser las propiedades técnicas más importantes de desarrollo.

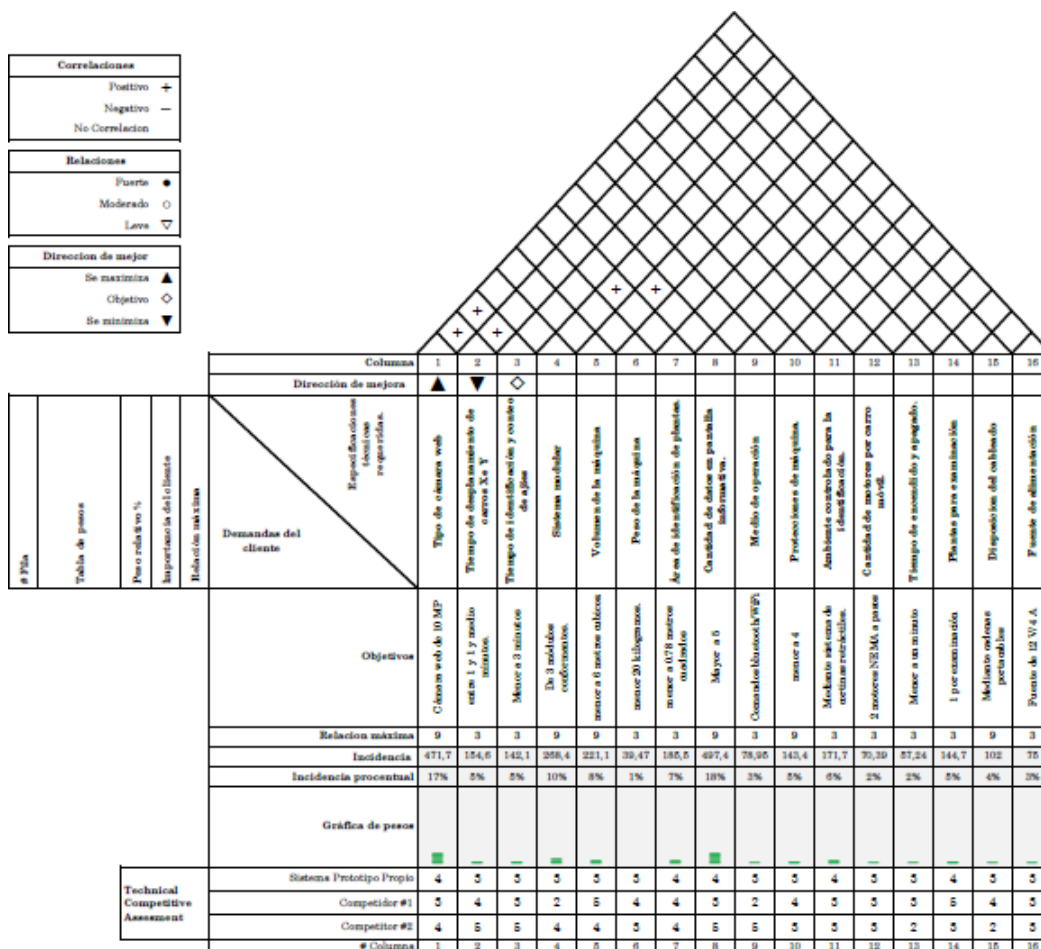


Figura 3. Porcentaje de importancia de características técnicas del sistema prototipo

1.6. IMPLANTACIÓN DE CASA DE CALIDAD

En la Figura 4 se muestra el esquema global de la casa de la calidad realizada para el presente proyecto de investigación.

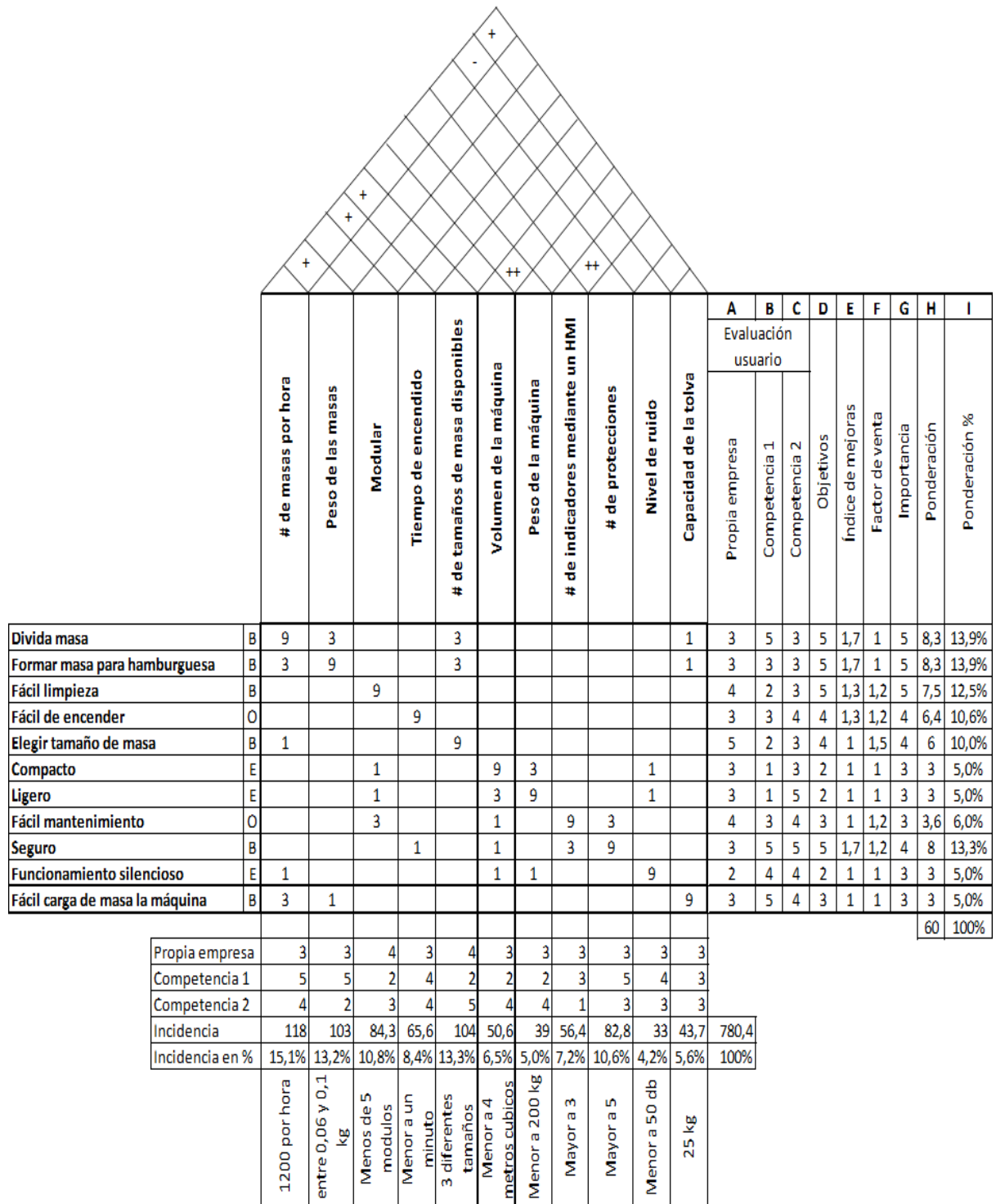


Figura 4. Casa de la calidad del sistema prototipo desarrollado en el presente documento

Anexo B: Matriz morfológica

Para cada requerimiento de la máquina se tienen dos alternativas con las cuales se realiza diferentes combinaciones con las demás alternativas de los diferentes requerimientos. En la Tabla 1 se presenta la matriz morfológica la cual tiene las alternativas a cada requerimiento.

Tabla 5. Matriz Morfológica del Proyecto de Investigación

| MEDIO DE EXAMINACIÓN DE PLANTAS DE AJÍ CAPSICUM ANNUUM | TIPO DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO | MECANISMO DE MOVIMIENTO | DESPLIEGUE DE DATOS AL USUARIO | ENCAPSULAMIENTO PARA GENERACIÓN DE AMBIENTE CONTROLADO |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|--|--|
| Cámara web de alta definición | Lineal | Mecanismo de correa y piñón | Interfaz informativa amigable al usuario | Mecanismo de cortinas retráctiles |
| Arreglo de cámaras secuenciales en paralelo. | Circular | Mecanismo de rueda y eje | Interfaz informativa amigable al usuario | Mecanismo de cortinas envolventes |

A continuación, en las Figuras 5, 6, 7 y 8 se muestran las cuatro alternativas deducibles que son el resultado de la matriz morfológica desarrollada. De estas opciones, se elige la mejor opción que permita

Figura 5. Matriz Morfológica del Proyecto de Investigación

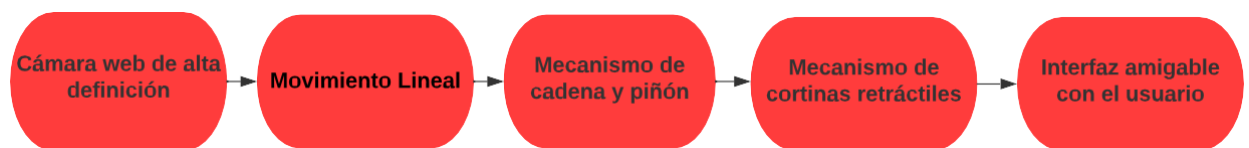


Figura 6. Matriz Morfológica del Proyecto de Investigación

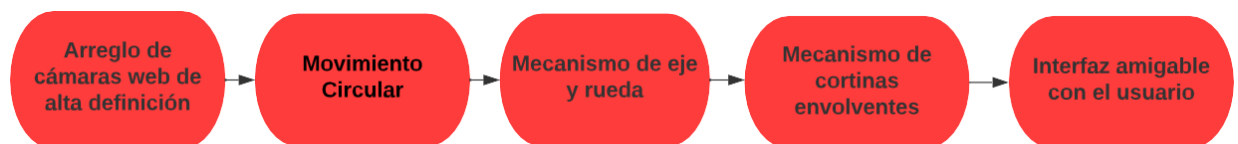


Figura 7. Matriz Morfológica del Proyecto de Investigación

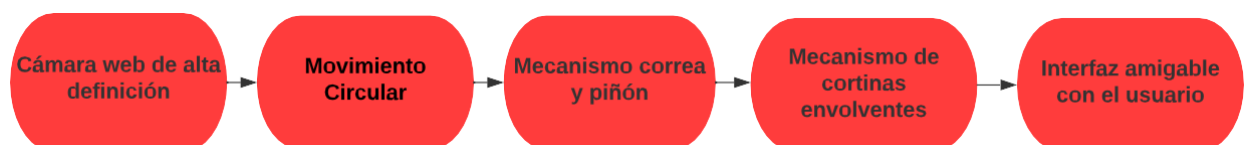
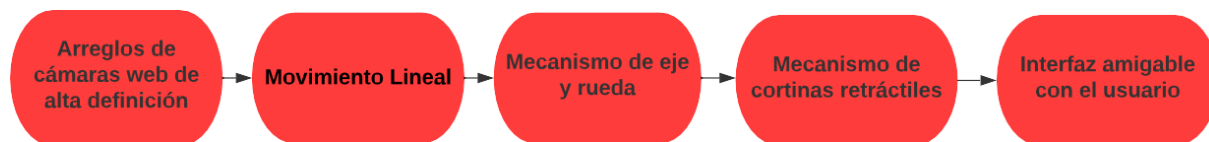


Figura 8. Matriz Morfológica del Proyecto de Investigación



Anexo C: Análisis de alternativas

En las siguientes líneas se detallan y enlistan los criterios bajo los cuales se realizó el análisis de alternativas para el presente proyecto de investigación.

- **Eficiencia mecánica:** Tanto la bancada de soporte como los carros móviles cartesianos X e Y deben ser diseñados de la manera más prolija posible. Las pruebas preliminares y sus respectivas correcciones evitarán que los mecanismos sufran daños en sus componentes activos o descompensaciones inerciales.
- **Precisión de Examinación:** La cámara web debe proporcionar imágenes sumamente claras al procesador para así poder realizar un análisis adecuado de las cantidades de ajíes y estados de maduración de la planta expuesta.
- **Seguridad de operación:** Debido a que el sistema prototipo posee partes mecánicas móviles que ejercen pequeñas y altas cantidades de torque, y también debido a su volumen y espacio de trabajo, debe constar con protecciones e indicadores de estado de operación para el usuario.
- **Integridad del área de examinación:** Debido a que el objetivo principal de la construcción del sistema prototipo es la examinación de plantas de *Capsicum Annuum*, es necesario que el área donde va a ser realizada esta tarea se encuentra limpia, sin residuos ni humedad.

Con el fin de determinar la prioridad de cada uno de los criterios presentados se realiza el cálculo del peso específico. En la Tabla 1 se presenta la evaluación .

Tabla 1. Cálculo del peso específico para la evaluación de alternativas

| | Efic Mec. | Prec Exam. | Seg Oper. | Integ Exam. | $\sum + 1$ | Ponderación |
|------------------------------------|-----------|------------|-----------|-------------|------------|-------------|
| Eficiencia Mecánica | | 0.5 | 1 | 1 | 3.5 | 0.291 |
| Precisión de examinación | 0.5 | | 1 | 1 | 3.5 | 0.291 |
| Seguridad de operación | 0 | 0 | | 1 | 2 | 0.177 |
| Integridad del área de examinación | 1 | 1 | 0.5 | | 3.5 | 0.241 |
| Total | | | | | 10 | 1.00 |

En la Tabla 2 se puede apreciar la evaluación de la eficiencia mecánica del sistema prototipo propuesto.

Tabla 2. Evaluación de la Eficiencia Mecánica del Sistema Prototipo

| Eficiencia Mecánica | A1 | A2 | A3 | A4 | $\sum + 1$ | Ponderación |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|--------------------|
| Alternativa 1 | | 1 | 0.5 | 0.5 | 3 | 0.30 |
| Alternativa 2 | 0.5 | | 0.5 | 0 | 2 | 0.20 |
| Alternativa 3 | 1 | 0.5 | | 0 | 2.5 | 0.25 |
| Alternativa 4 | 0.5 | 0 | 1 | | 2.5 | 0.25 |
| Total | | | | | 10 | 1.00 |

En la Tabla 3 se puede apreciar la evaluación de la examinación del sistema prototipo del sistema prototipo propuesto.

Tabla 3. Evaluación de la Precisión de Examinación del Sistema Prototipo

| Precisión de examinación | A1 | A2 | A3 | A4 | $\sum + 1$ | Ponderación |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|--------------------|
| Alternativa 1 | | 1 | 0.5 | 1 | 3.5 | 0.35 |
| Alternativa 2 | 0 | | 1 | 1 | 3 | 0.30 |
| Alternativa 3 | 0.5 | 0 | | 1 | 2.5 | 0.25 |
| Alternativa 4 | 1 | 1 | 0 | | 3 | 0.30 |
| Total | | | | | 10 | 1.00 |

En la Tabla 4 se puede apreciar la evaluación de la seguridad de operación del sistema prototipo propuesto.

Tabla 4. Evaluación de la Seguridad de Operación del Sistema Prototipo

| Seguridad de operación | A1 | A2 | A3 | A4 | $\sum + 1$ | Ponderación |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|--------------------|
| Alternativa 1 | | 1 | 1 | 0 | 3 | 0.30 |
| Alternativa 2 | 0.5 | | 0.5 | 1 | 3 | 0.30 |
| Alternativa 3 | 0.5 | 0.5 | | 0 | 2 | 0.20 |
| Alternativa 4 | 1 | 0 | 0.5 | | 2.5 | 0.25 |
| Total | | | | | 10 | 1.00 |

En la Tabla 5 se puede apreciar la evaluación de la integridad del área de examinación del sistema prototipo propuesto.

Tabla 5. Evaluación de la Integridad del Área de Examinación del Sistema Prototipo

| Integridad del área de examinación | A1 | A2 | A3 | A4 | $\sum + 1$ | Ponderación |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|--------------------|
| Alternativa 1 | | 0.5 | 1 | 1 | 3.5 | 0.35 |
| Alternativa 2 | 0 | | 0 | 0.5 | 1.5 | 0.15 |
| Alternativa 3 | 1 | 0.5 | | 1 | 3.5 | 0.35 |
| Alternativa 4 | 0.5 | 1 | 0 | | 2.5 | 0.25 |
| Total | | | | | 10 | 1.00 |

Anexo D: Catálogo Dipac para Tubo Estructural Rectangular



DIPAC[®]
PRODUCTOS DE ACERO

RECTANGULAR

TUBO ESTRUCTURAL RECTANGULAR

Especificaciones Generales

| | |
|----------------------|---------------------------------|
| Norma | ASTM A-500 |
| Recubrimiento | Negro o galvanizado |
| Largo normal | 6 mts. |
| Otros largos | Previa Consulta |
| Dimensiones | Desde 12mm x 25mm a 40mm x 80mm |
| Espesor | Desde 2.0mm a 3.0mm |



| DIMENSIONES | | | | AREA | EJES X-X | | | EJES Y-Y | | |
|-------------|------|------------|-----------|----------|----------|-------|------|----------|-------|------|
| A mm | B mm | ESPESOR mm | PESO Kg/m | AREA cm2 | I cm4 | W cm3 | i cm | I cm4 | W cm3 | i cm |
| 20 | 40 | 1,2 | 1,09 | 1,32 | 2,61 | 1,30 | 1,12 | 0,88 | 0,88 | 0,83 |
| 20 | 40 | 1,5 | 1,35 | 1,65 | 3,26 | 1,63 | 1,40 | 1,09 | 1,09 | 0,81 |
| 20 | 40 | 2,0 | 1,78 | 2,14 | 4,04 | 2,02 | 1,37 | 1,33 | 1,33 | 0,79 |
| 25 | 50 | 1,5 | 1,71 | 2,10 | 6,39 | 2,56 | 1,74 | 2,19 | 1,75 | 1,02 |
| 25 | 50 | 2,0 | 2,25 | 2,74 | 8,37 | 3,35 | 1,75 | 2,80 | 2,24 | 1,01 |
| 25 | 50 | 3,0 | 3,30 | 4,14 | 12,56 | 5,02 | 1,74 | 3,99 | 3,19 | 0,99 |
| 30 | 50 | 1,5 | 1,88 | 2,25 | 7,27 | 2,91 | 1,80 | 3,32 | 2,21 | 1,21 |
| 30 | 50 | 2,0 | 2,41 | 2,94 | 9,52 | 3,81 | 1,80 | 4,28 | 2,85 | 1,21 |
| 30 | 50 | 3,0 | 3,30 | 4,21 | 12,78 | 5,11 | 1,74 | 5,66 | 3,77 | 1,16 |
| 30 | 70 | 2,0 | 3,03 | 3,74 | 22,20 | 6,34 | 2,44 | 5,85 | 3,90 | 1,25 |
| 30 | 70 | 3,0 | 4,48 | 5,41 | 30,50 | 8,71 | 2,37 | 7,84 | 5,23 | 1,20 |
| 40 | 60 | 1,5 | 2,29 | 2,91 | 14,90 | 4,97 | 2,26 | 7,94 | 3,97 | 1,65 |
| 40 | 60 | 2,0 | 3,03 | 3,74 | 18,08 | 6,13 | 2,22 | 9,81 | 4,90 | 1,62 |
| 40 | 60 | 3,0 | 4,48 | 5,41 | 25,31 | 8,44 | 2,16 | 13,37 | 6,69 | 1,57 |
| 30 | 70 | 1,5 | 2,34 | 2,91 | 18,08 | 5,17 | 2,49 | 4,76 | 3,17 | 1,28 |
| 30 | 70 | 2,0 | 2,93 | 3,74 | 22,20 | 6,34 | 2,44 | 5,85 | 3,90 | 1,25 |
| 30 | 70 | 3,0 | 4,25 | 5,41 | 30,50 | 8,71 | 2,37 | 7,84 | 5,23 | 1,20 |
| 40 | 80 | 1,5 | 2,76 | 3,74 | 31,75 | 7,94 | 2,91 | 10,77 | 5,39 | 1,70 |
| 40 | 80 | 2,0 | 3,66 | 4,54 | 37,32 | 9,33 | 2,87 | 12,70 | 6,35 | 1,67 |
| 40 | 80 | 3,0 | 5,42 | 6,61 | 52,16 | 13,04 | 2,81 | 17,49 | 8,75 | 1,63 |
| 50 | 100 | 2,0 | 4,52 | 5,74 | 74,94 | 14,99 | 3,61 | 25,65 | 10,26 | 2,11 |
| 50 | 100 | 3,0 | 6,71 | 8,41 | 106,34 | 21,27 | 3,56 | 35,97 | 14,39 | 2,07 |
| 50 | 150 | 2,0 | 6,17 | 7,74 | 207,45 | 27,66 | 5,18 | 37,17 | 14,87 | 2,19 |
| 50 | 150 | 3,0 | 9,17 | 11,41 | 298,35 | 39,78 | 5,11 | 52,54 | 21,02 | 2,15 |

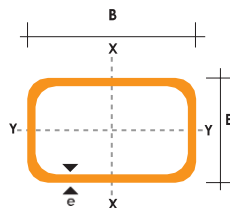


Figura 1. Tubo estructural rectangular

Anexo E: Catálogo Dipac para Tubo Estructural OMEGA

PERFILES ESTRUCTURALES

OMEGA

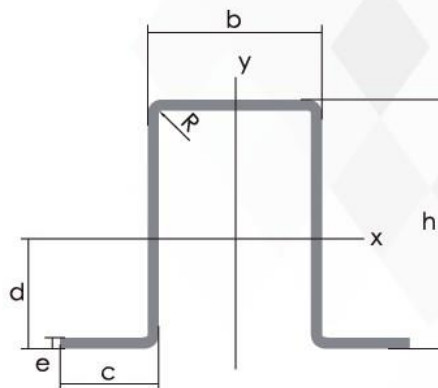
Especificaciones Generales:

| | |
|----------------------|----------------------------|
| Norma: | NTE INEN 1623 |
| Calidad: | ASTM A36 - SAE J 403 1008 |
| Largo Normal: | 6.00m y medidas especiales |
| Espesores: | Desde 2mm - 3mm |
| Acabado: | Acero negro y galvanizado |



| Dimensiones | | | | Área | Masa | Eje X - X | | | | Eje Y - Y | | |
|-------------|----|----|---|-----------------|-----------------|-----------------|------|------|------|-----------------|-------|------|
| mm | | | | | | cm ² | kg/m | I | W | i | d | W |
| b | h | c | e | cm ⁴ | cm ³ | | | cm | cm | cm ³ | cm | cm |
| 35 | 50 | 20 | 2 | 3,24 | 2,54 | 11,25 | 4,36 | 1,86 | 2,42 | 10,93 | 3,08 | 1,84 |
| 50 | 50 | 20 | 2 | 3,54 | 2,78 | 12,95 | 4,92 | 1,91 | 2,63 | 21,08 | 4,90 | 2,44 |
| 75 | 50 | 20 | 2 | 4,04 | 3,17 | 15,20 | 5,22 | 1,94 | 2,91 | 47,01 | 8,74 | 3,41 |
| 75 | 50 | 20 | 3 | 5,86 | 4,60 | 20,90 | 7,13 | 1,89 | 2,93 | 65,98 | 12,11 | 3,36 |
| 100 | 50 | 20 | 2 | 4,54 | 3,56 | 16,96 | 5,42 | 1,93 | 3,13 | 85,56 | 12,58 | 4,34 |
| 100 | 50 | 20 | 3 | 6,61 | 5,19 | 23,38 | 7,45 | 1,88 | 3,14 | 121,12 | 18,08 | 4,28 |
| 125 | 50 | 20 | 2 | 5,04 | 3,96 | 18,35 | 5,54 | 1,91 | 3,31 | 138,29 | 17,18 | 5,24 |
| 125 | 50 | 20 | 3 | 7,36 | 5,78 | 25,36 | 7,64 | 1,86 | 3,32 | 196,91 | 24,77 | 5,17 |
| 150 | 50 | 20 | 2 | 5,54 | 4,35 | 19,51 | 5,66 | 1,88 | 3,45 | 206,54 | 22,23 | 6,11 |
| 150 | 50 | 20 | 3 | 8,11 | 6,37 | 26,96 | 7,79 | 1,82 | 3,46 | 295,70 | 32,14 | 6,04 |

Medidas especiales bajo pedido



*Otras calidades, largos y acabados: previa consulta

Anexo F: Catálogo Dipac para Tubo Mecánico Cuadrado

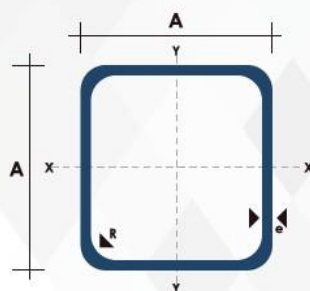
TUBO MECÁNICO CUADRADO



Especificaciones Generales:

| | |
|---------------------|----------------------------|
| Norma: | NTE INEN 2415 |
| Calidad: | JIS 3141 SPCC SD |
| Acabado: | Acero negro o galvanizado |
| Largos: | 6,00m y medidas especiales |
| Dimensiones: | Desde 12mm a 50mm |
| Espesores: | Desde 0,80mm a 1,50mm |

| NOMENCLATURA | |
|--------------|--|
| Área = | Área de la selección transversal del tubo, cm ² |
| I = | Momento de inercia de la sección, cm ⁴ |
| W = | Módulo resistente de la sección, cm ³ |
| i = | Radio de giro de la sección cm |



| Dimensiones | | | Área | Ejes X-Xe Y-Y | | |
|-------------|----------------|-----------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| A mm | Espesor mm (e) | Peso Kg/m | Área cm ² | I cm ⁴ | W cm ³ | i cm ³ |
| 12 | 0,8 | 0,30 | 0,37 | 0,09 | 0,14 | 0,48 |
| 12 | 1,0 | 0,37 | 0,50 | 0,11 | 0,18 | 0,47 |
| 15 | 0,8 | 0,36 | 0,45 | 0,15 | 0,20 | 0,58 |
| 15 | 1,0 | 0,45 | 0,61 | 0,20 | 0,26 | 0,57 |
| 20 | 0,8 | 0,49 | 0,61 | 0,38 | 0,38 | 0,79 |
| 20 | 1,0 | 0,60 | 0,83 | 0,50 | 0,50 | 0,77 |
| 20 | 1,2 | 0,72 | 0,90 | 0,53 | 0,53 | 0,77 |
| 20 | 1,5 | 0,88 | 1,05 | 0,58 | 0,58 | 0,74 |
| 25 | 0,8 | 0,61 | 0,77 | 0,61 | 0,61 | 0,99 |
| 25 | 1,0 | 0,76 | 1,05 | 0,80 | 0,80 | 0,98 |
| 25 | 1,2 | 0,90 | 1,14 | 0,87 | 0,87 | 0,97 |
| 25 | 1,5 | 1,12 | 1,35 | 0,97 | 0,97 | 0,95 |
| 30 | 0,8 | 0,74 | 0,93 | 0,89 | 0,89 | 1,19 |
| 30 | 1,0 | 0,92 | 1,27 | 1,18 | 1,18 | 1,18 |
| 30 | 1,2 | 1,09 | 1,38 | 1,28 | 1,28 | 1,18 |
| 30 | 1,5 | 1,35 | 1,65 | 1,47 | 1,47 | 1,15 |
| 40 | 0,8 | 0,99 | 1,25 | 1,61 | 1,61 | 1,60 |
| 40 | 1,0 | 1,23 | 1,71 | 2,16 | 2,16 | 1,59 |
| 40 | 1,2 | 1,47 | 1,86 | 2,34 | 2,34 | 1,59 |
| 40 | 1,5 | 1,82 | 2,25 | 2,74 | 2,74 | 1,56 |
| 50 | 1,2 | 1,84 | 2,34 | 3,72 | 3,72 | 1,99 |
| 50 | 1,5 | 2,29 | 2,85 | 4,42 | 4,42 | 1,97 |

www.dipacmanta.com

TUBERÍA

Anexo G: Manual de Operación y Mantenimiento

ADVERTENCIA Para poder proceder con la operación y el mantenimiento preventivo del sistema prototipo para la examinación de plantas de ají (*Capsicum Annum*) es necesario tener en cuenta que el sistema está conformado de piezas pequeñas y equipos activos que trabajan con voltaje y corriente que, de no ser manipulado por una persona idónea con los conocimientos técnicos adecuados en el campo, pueden causar accidentes al personal humano y pérdidas de insumos por retrasos significativos en las líneas de producción en la cual se encuentre el sistema prototipo explicado en este documento.



Inicialmente, el técnico que va a estar en contacto con el sistema prototipo debe cerciorarse que el carro X e Y conste de todos los pernos de anclaje de seguridad de 3/8" al perfil rectangular (2 por lado, 8 en total). De no darse esta situación, es necesario adquirir repuestos de estos pernos para suplir esta ausencia. Véase en la Figura 1 los pernos mencionados en este apartado.

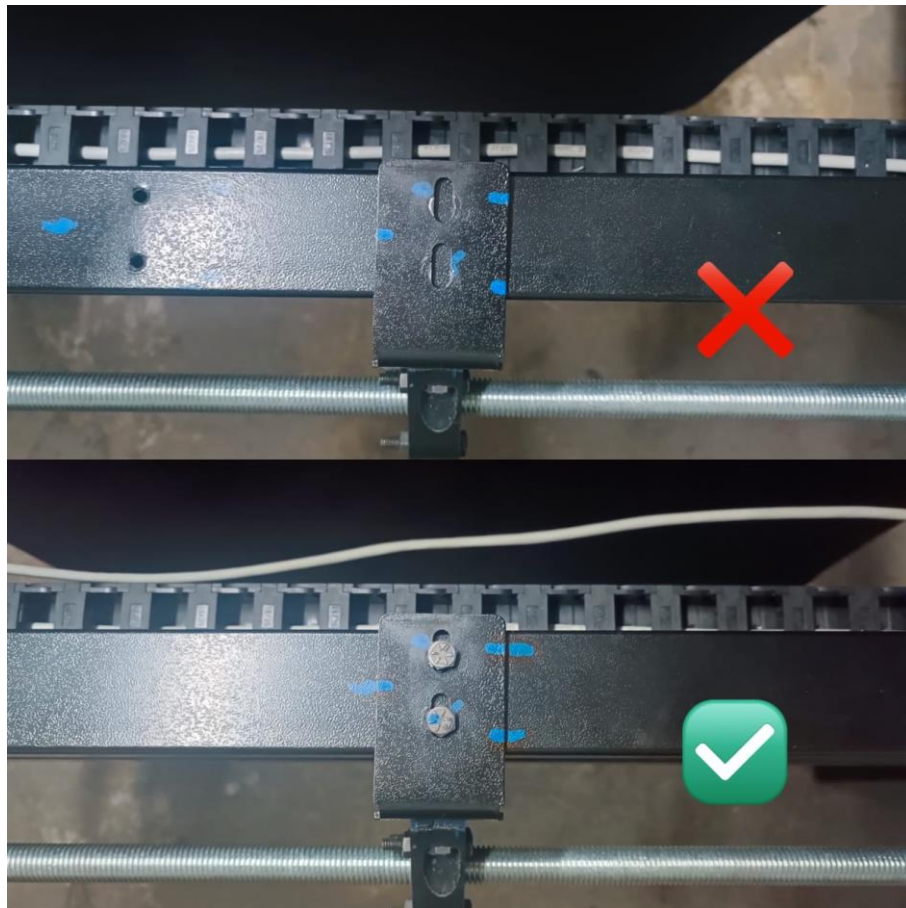


Figura 1. Ilustración de indicativo de cómo deben encontrarse los pernos de anclaje de carro móvil X e Y.

El técnico encargado deberá revisar si el carro X e Y presenta alguna dificultad al desplazarse sobre los ejes lineales, esto se debe solucionar engrasando los ejes a un nivel moderado a todo su largo y posteriormente ejercer movimiento de izquierda a derecha con el fin de que la grasa aplicada se esparza sobre todo el elemento. Véase en la Figura 2 una breve representación de esta descripción.

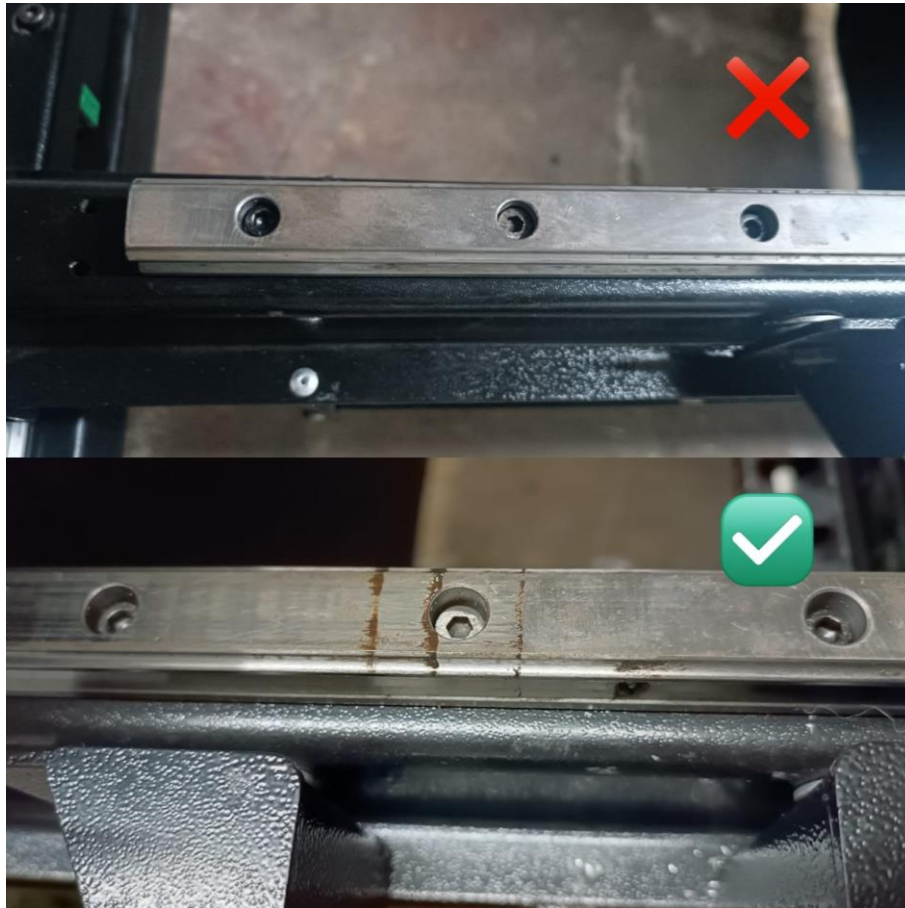


Figura 2. Ilustración de indicativo de cómo debe darse mantenimiento a los ejes lineales del sistema prototipo para un adecuado desplazamiento del carro X e Y.

Si el carro X e Y no presenta ninguna dificultad para desplazarse linealmente, el técnico deberá hacer una revisión, mediante simple inspección visual, de las cadenas del mecanismo de transmisión de movimiento a los motores. Las cadenas deben estar colocadas correctamente en los piñones y no estar sueltas en ninguna parte de ellas. Véase en la Figura 3 como deben estar colocadas las cadenas de transmisión.

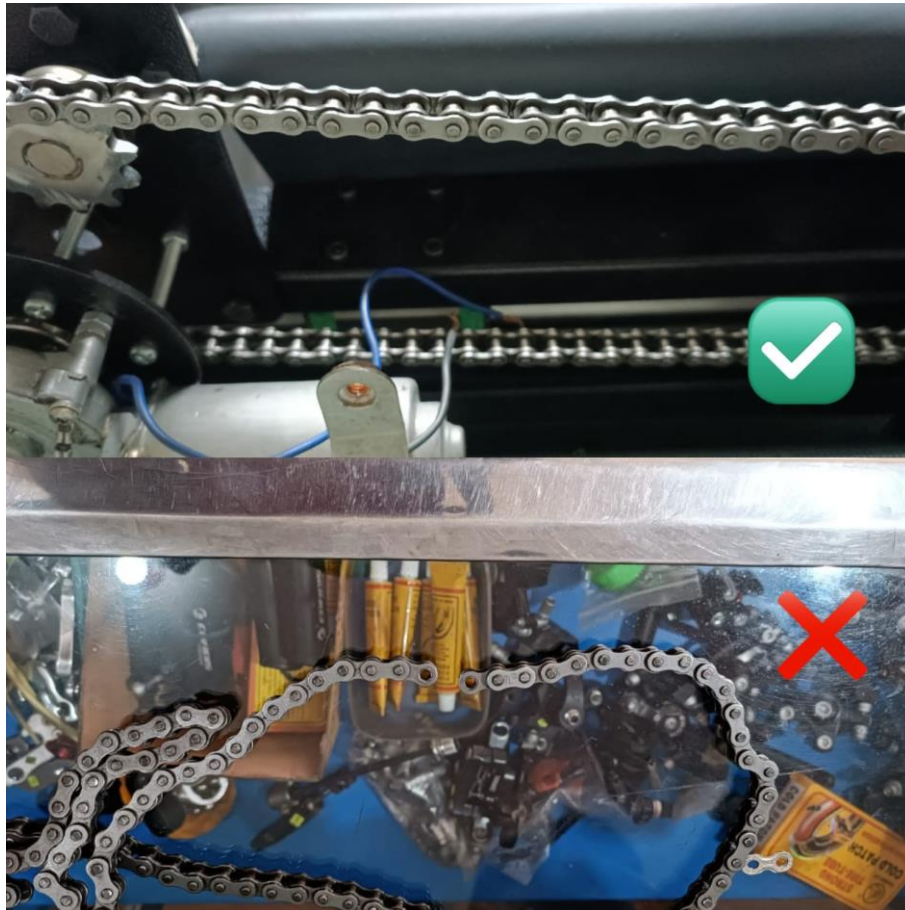


Figura 3. Ilustración de indicativo de cómo deben estar las cadenas de transmisión de movimiento a los motores del sistema prototipo.

Una vez realizadas estas actividades, es necesario que el técnico revise las cadenas portacables. Estas deben estar ancladas y sujetas con seguridad a la bancada con los cables debidamente organizados en su interior. Si se encontrase algún cable salido de esta cadena es necesario identificar a que elemento corresponde el cable y recolectarlo. No se debe poner en marcha, por ningún motivo, la máquina en marcha. Véase en la Figura 4 esta actividad.

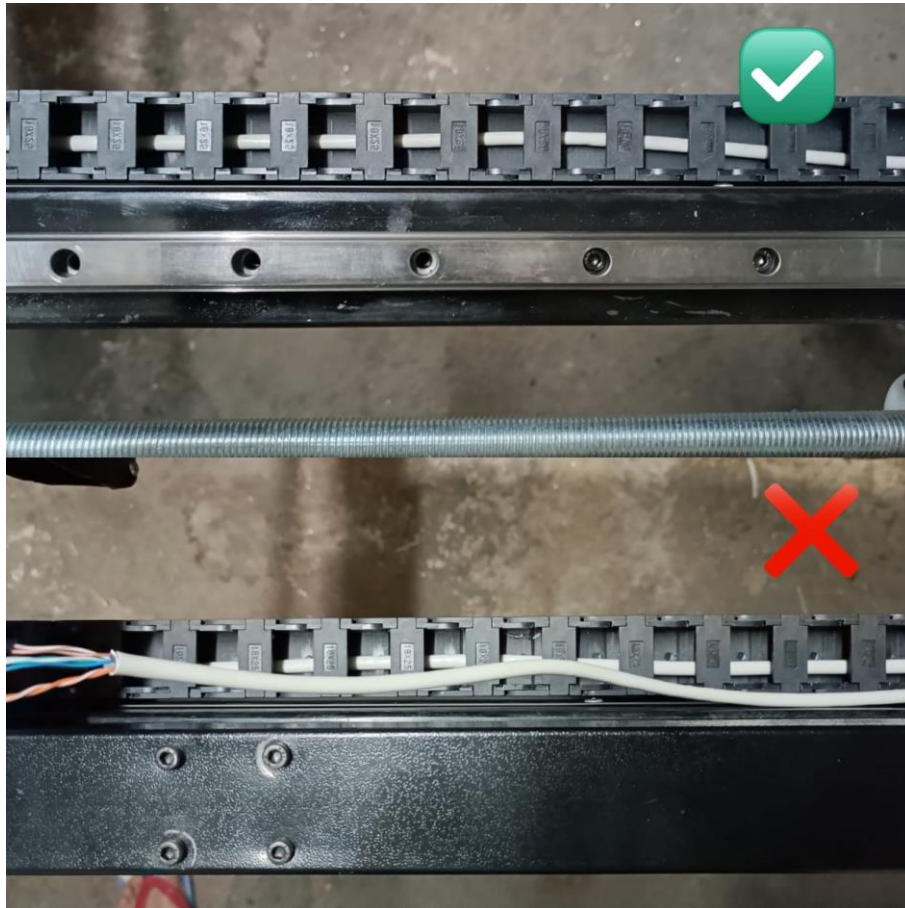


Figura 4. Ilustración de indicativo de cómo deben estar la cadenas portacables del sistema prototipo.

Se debe revisar también la canaleta de cables de control que se encuentra ubicada a lo largo y ancho de la bancada de soporte y del carro X e Y. Es importante que ninguno de los cables, o en su lugar la tapa de la canaleta, se encuentren en su lugar y sin cables por fuera. Esto evitará que, con la traslación del carro X E y, estos elementos sufran daños y desconexiones en sus partes. Véase, en la Figura 5, este procedimiento.



Figura 5. Fotografía de la canaleta plástica del cableado de control del sistema. Véase que esta parte no presenta, ni debe presentar, ningún cable salido de su hendidura.

Después de esto, el técnico debe revisar que las cortinas retráctiles del sistema de encapsulamiento de plantas no presentan aberturas ni orificios que puedan permitir el ingreso de luz de la intemperie dentro del área de examinación de plantas. Si existiese algún agujero en las cortinas, el programa podría presentar problemas a la hora de examinar las plantas de ají Capsicum. Véase en la Figura 6 la integridad de las cortinas retráctiles.



Figura 6. Ilustración de indicativo de cómo deben estar las cortinas retráctiles del sistema prototipo.

Después de esta actividad, es primordial que la cámara sea revisada y que se encuentre en buenas condiciones ya que este es el elemento neurálgico del sistema. El técnico, utilizando un paño suave y ligeramente húmedo, debe limpiar el lente de la cámara, retirando toda muestra de polvo que se encuentre presente y desempañando todo su campo visual. En la Figura 7 se puede observar esta actividad.

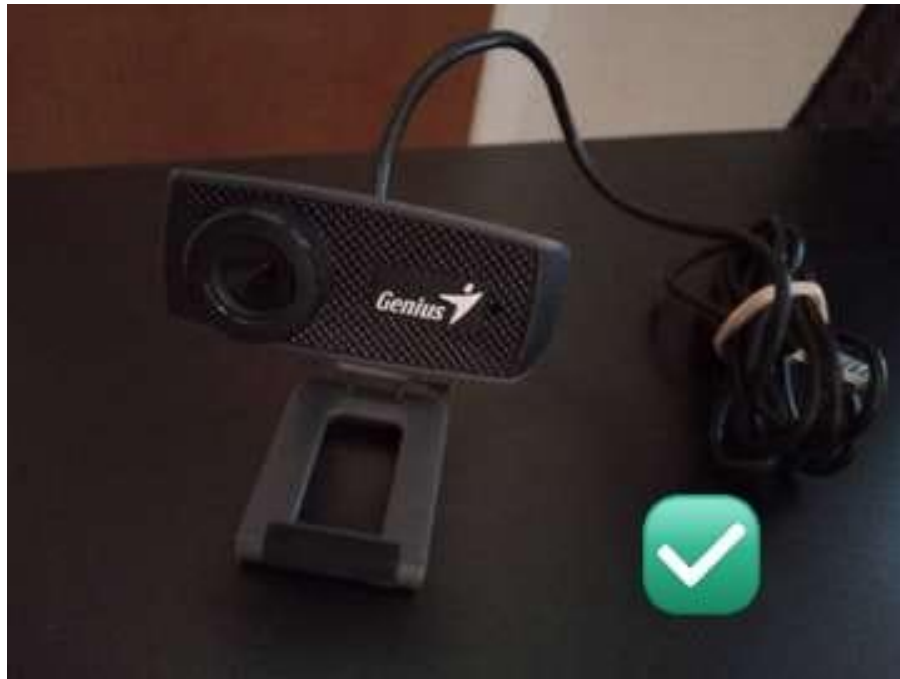


Figura 7. Ilustración de indicativo de cómo debe verse la cámara web de examinación de plantas de ají.

La caja de control del sistema, previo a su encendido, debe ser revisada para confirmar de que no presente ninguna señal de impurezas o humedad en su interior. En el caso de encontrarse alguna clase de residuo limpiar y adecuar el espacio para su posterior energizado. En la Figura 8 se puede observar las partes conformantes de la caja de control. Nótese que, tanto en las Figuras 8 y 9, la caja de control mantiene una integridad impecable sin residuos ni humedad.



Figura 8. Fotografía de la caja de control del sistema prototipo junto a todos sus elementos eléctricos y electrónicos pasivos previo a su encendido y puesta en marcha.



Figura 9. Fotografía de la caja de control del sistema prototipo junto a todos sus elementos eléctricos y electrónicos pasivos energizado y puesto en marcha.